



**Luís Pedro de Brito e  
Melo**

**Caracterização e produção de redes de período  
longo em fibra óptica**



**Luís Pedro de Brito e  
Melo**

**Caracterização e produção de redes de período  
longo em fibra óptica**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Rogério Nunes Nogueira, Investigador Auxiliar no Instituto de Telecomunicações – pólo de Aveiro

## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor João Lemos Pinto**  
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Rogério Nunes Nogueira**  
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor José Figueiredo Longras**  
Investigador Auxiliar na Universidade do Algarve

## **agradecimentos**

Nesta secção gostaria de expressar os meus agradecimentos às pessoas que contribuíram para a realização desta dissertação.

Quero agradecer em primeiro lugar ao meu orientador, o Professor Doutor Rogério Nogueira pela liberdade de acção concedida que foi determinante para o desenvolvimento de todo o trabalho. A orientação que me deu no domínio dos sensores ópticos e o conhecimento que me transmitiu foram muito importantes para a minha formação nesta área.

Ao Carlos, que gravou as redes por exposição de laser UV. Agradeço-lhe igualmente, a sua paciência durante as gravações e a companhia nos ensaios de laboratório.

Fico grato à Lúcia e à Nélia pela valiosa ajuda e disponibilidade em responder a todas as minhas questões. As suas sugestões foram incondicionalmente importantes para a elaboração deste documento.

Não poderia deixar de tecer uma consideração ao Malaquias e à Inês que ao longo do meu percurso académico tornaram o meu dia-a-dia mais alegre e dos quais guardo boas recordações.

Um agradecimento muito especial à Agnieszka, reconhecendo todo o seu apoio, paciência e compreensão ao longo deste ano.

Por fim, agradeço à minha família, em especial à minha mãe e irmãs o apoio e a garantia de estarem sempre por perto.

A todos vocês,  
O meu Muito Obrigado!

**palavras-chave**

Sensores em fibra óptica, redes de período longo em fibra óptica, sistema de gravação, índice de refração.

**resumo**

O presente trabalho tem como objectivo a caracterização e produção de redes de período longo em fibra óptica (LPG). Tendo em conta a dependência das LPGs ao meio envolvente, é recomendável a sua utilização como sensor de índice de refração com grande sensibilidade tornando-as particularmente interessantes na monitorização de meios aquosos.

Deste modo, realizaram-se ensaios de caracterização das LPGs a diversas grandezas físicas, índice de refração, temperatura e deformação utilizando para tal redes gravadas por laser UV e por arco eléctrico. Completou-se este estudo utilizando redes sujeitas a um ataque de corrosão.

Em paralelo, foi implementado o método de gravação por arco eléctrico que surge como uma alternativa ao sistema de gravação existente no Instituto de Telecomunicações. Este novo método veio possibilitar a gravação de redes de forma mais rápida e com a vantagem acrescida de resistirem a altas temperaturas.

Ao longo do trabalho, foram obtidos diferentes valores de sensibilidade de acordo com o modo de ressonância monitorizado. No seguimento dos resultados obtidos, poderá ser desenvolvido no futuro um sensor multi-parâmetro capaz de identificar simultaneamente dois parâmetros físicos distintos.

**keywords**

Optical sensors, fiber optic long period grating, recording system, refractive index.

**abstract**

The aim of this thesis is to study and develop fiber optic long-period gratings (LPGs). As LPGs depend on the refractive index of the surrounding environment they can be employed as refractive index sensor with good sensor accuracy. This makes LPGs a particularly interesting option in monitoring aqueous solutions.

The influence of refractive index, temperature and strain were examined. For this proposal we compare the behaviour of LPGs recorded with UV laser exposition and electric arc discharge to the above-mentioned parameters. The study was completed with the characterization of LPGs with cladding etching.

We have also implemented the electric arc setup that appears to be a good alternative to the UV recording system. The work carried out has shown a good stability of those gratings recorded with electric arc technique at very high temperature.

Finally, along the work we obtained different values of sensitivity according to the observed mode. We can conclude that this can lead to the future development of multi-parameter sensor able to identify two different parameters simultaneously.

## Lista de figuras

---

Figura 1	Rede de Bragg após um ataque químico
Figura 2	Interferómetro de Fabry-Pérot
Figura 3	Diagrama de funcionamento de uma rede de Bragg inclinada
Figura 4	Espectro de transmissão de uma rede de Bragg inclinada
Figura 5	Representação de uma rede de período longo
Figura 6	Ilustração geométrica representativa de a) rede de Bragg. b) rede de período longo
Figura 7	Diagrama geométrico da difracção de uma onda de luz numa rede
Figura 8	Simulação da resposta do comprimento de onda de ressonância em função do período, para o acoplamento entre os modos a) 1 a 9 e b) 18 a 27
Figura 9	Sensibilidade de quatro diferentes modos de ressonância à temperatura identificados por A a D. A linha a tracejado corresponde à sensibilidade de uma FBG
Figura 10	Sensibilidade de quatro diferentes modos de ressonância à deformação identificados por A a D. A linha a tracejado corresponde à sensibilidade de uma FBG
Figura 11	Gráfico do deslocamento do comprimento de onda em função do índice de refração do meio envolvente
Figura 12	Gráfico do valor de transmissão de um modo de ressonância em função do índice do meio envolvente
Figura 13	Unidade de hidrogenação de fibras ópticas
Figura 14	Configuração da fabricação de LPGs através de radiação UV. AM: máscara de amplitude e PC: controlador de polarização
Figura 15	Gravação de LPGs através de laser UV por a) máscara de amplitude e b) ponto-a-ponto
Figura 16	Diagrama ilustrativo do sistema de gravação pelo método de exposição de laser UV ponto-a-ponto

Figura 17	Diagrama ilustrativo do sistema de gravação pelo método de arco eléctrico
Figura 18	Montagem experimental do sistema de gravação por arco eléctrico
Figura 19	Espectro de uma LPG gravada por arco eléctrico e simulada através do Optgrating
Figura 20	Fibra óptica sem revestimento a) antes da gravação e b) após a gravação
Figura 21	Montagem experimental para a realização de ensaios ao índice de refracção
Figura 22	Suporte experimental para a realização de ensaios ao índice de refracção
Figura 23	Espectro da variação do comprimento de onda para diferentes índices de refracção a tensão constante, LPG1
Figura 24	Caracterização de uma LPG gravada por laser UV ao índice de refracção, LPG1. Os parâmetros de simulação encontram-se na tabela 1 da secção 4.4.1.
Figura 25	Caracterização de uma LPG gravada por laser UV à deformação, LPG1
Figura 26	Espectro da variação do comprimento de onda para diferentes temperaturas, LPG2
Figura 27	Caracterização de uma LPG gravada por laser UV à temperatura, LPG2.
Figura 28	Caracterização de uma LPG gravada por arco eléctrico e por UV ao índice de refracção, LPG5 e LPG1, respectivamente
Figura 29	Caracterização de uma LPG gravada por arco eléctrico e por UV à deformação, LPG5 e LPG1, respectivamente.
Figura 30	Caracterização de uma LPG gravada por arco eléctrico e por UV à temperatura, LPG5 e LPG2, respectivamente.
Figura 31	Espectro de comparação de uma LPG antes e após a sua corrosão, LPG3
Figura 32	Caracterização ao índice de refracção de uma LPG antes e após o ataque químico, LPG3
Figura 33	Caracterização de uma LPG corroída e normal à deformação, LPG3 e LPG1 respectivamente
Figura 34	Caracterização de uma LPG corroída e normal à temperatura,



LPG3 e LPG2 respectivamente

- Figura 35 Diagrama da montagem de ensaios a altas temperaturas
- Figura 36 Montagem experimental do sistema para ensaios de altas temperaturas.
- Figura 37 Caracterização de uma LPG gravada através de radiação UV à temperatura, LPG2.
- Figura 38 Espectro de transmissão de uma LPG à temperatura de 1060 °C, LPG6
- Figura 39 Caracterização de uma LPG gravada por arco eléctrico à temperatura, LPG6.
- Figura 40 Caracterização de uma LPG gravada por arco eléctrico à temperatura. Ensaio efectuado após ter submetido a LPG à temperatura de 1060 °C. LPG6.
- Figura 41 Espectro do segundo ensaio à temperatura da LPG6 a 900 °C durante 30 minutos

# Índice

---

*o júri*  
*agradecimentos*  
*resumo*  
*abstract*  
*Lista de figuras*  
*Índice*

<b>Capítulo 1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação.....	1
1.2. Organização e âmbito do trabalho.....	2
1.2.1. Enquadramento e objectivo.....	2
1.2.2. Organização do trabalho .....	3
<b>Capítulo 2. Introdução às redes de período longo .....</b>	<b>5</b>
2.1. Perspectivas históricas .....	5
2.1.1. Desenvolvimento da fotossensibilidade .....	5
2.2. Desenvolvimento das redes de período longo.....	6
2.2.1. Estado da arte na medição de índice de refacção .....	7
2.2.2. Estado da arte de redes de período longo .....	9
<b>Capítulo 3. Teoria das redes de período longo .....</b>	<b>11</b>
3.1. Fundamentação teórica básica .....	11
3.2. Sensores de redes de período longo.....	14
3.2.1. Sensibilidade à temperatura .....	15
3.2.2. Sensibilidade à deformação longitudinal .....	16
3.2.3. Sensibilidade ao índice de refacção.....	17
<b>Capítulo 4. Gravação de redes de período longo .....</b>	<b>19</b>
4.1. Introdução .....	19
4.2. Processo de hidrogenação .....	19
4.3. Gravação por laser UV.....	20
4.3.1. Descrição do sistema de gravação .....	22

4.4.	Gravação através de arco eléctrico .....	23
4.4.1.	Descrição do sistema de gravação .....	23
<b>Capítulo 5.</b>	<b>Caracterização de redes de período longo .....</b>	<b>27</b>
5.1.	LPGs gravadas através laser UV (@248nm) .....	27
5.1.1.	Sensibilidade ao índice de refração .....	27
5.1.2.	Sensibilidade à deformação longitudinal .....	30
5.1.3.	Sensibilidade à temperatura .....	31
5.2.	LPGs gravadas por arco eléctrico .....	33
5.2.1.	Sensibilidade ao índice de refração .....	33
5.2.2.	Sensibilidade à deformação .....	33
5.2.3.	Sensibilidade à temperatura .....	34
5.3.	Corrosão de redes gravadas através de laser UV .....	35
5.3.1.	Sensibilidade ao índice de refração .....	35
5.3.2.	Sensibilidade à deformação .....	36
5.3.3.	Sensibilidade à temperatura .....	37
5.4.	Caracterização de LPGs a altas temperaturas .....	38
5.4.1.	Redes gravadas por UV .....	38
5.4.2.	Redes gravadas por arco eléctrico .....	39
<b>Capítulo 6.</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>43</b>
6.1.	Conclusões.....	43
6.2.	Trabalhos futuros .....	45
<b>Apêndice A</b>	<b>Lista de redes utilizadas .....</b>	<b>46</b>
<b>Obras citadas</b>	<b>.....</b>	<b>47</b>

## **1.1. Motivação**

Nas últimas décadas o desenvolvimento da tecnologia de informação e comunicação tem verificado um progresso cada vez mais acelerado. Em 1956 o físico indiano Narinder Singh Kapany inventa a fibra óptica marcando o início do processo que conduziu a uma revolução na área das comunicações ópticas.

A utilização de sensores de fibra óptica está inicialmente relacionada com a descoberta do laser por Arthur Schawlow e Charles Townes em 1958. Em 1978 surgem as redes de Bragg em fibra óptica por intermédio de Kenneth Hill que constituem um passo importante no desenvolvimento de sensores ópticos e no avanço da tecnologia de gravação de redes de difracção.

Entretanto Charles Kao e George Hockham do Standard Communication Laboratory (UK) publicaram um artigo [1] em 1966 que sugeria a possibilidade de transmissão de informação através de fibras ópticas. Esta descoberta constitui o despertar do interesse e o início de uma nova corrida mundial no estudo da diminuição da atenuação na transmissão de informação por fibra óptica.

Ao mesmo tempo que áreas tais como medicina, engenharia civil, biologia e aeronáutica batem novos recordes de desenvolvimento tecnológico, o que tem conduzido a uma revolução no mercado, surge a questão de como medir alguns parâmetros de interesse. Como tal, é conveniente que a área dos sensores esteja preparada para dar uma resposta adequada ao progresso científico e tecnológico que se lhe exige. Muitas vezes não nos damos conta mas, a verdade é que, são inúmeras as situações que requerem a medição de um determinado parâmetro, com o intuito de quantificar algo.

Os sensores em fibra óptica oferecem vantagens em relação a sensores eléctricos tais como, imunidade a interferências electromagnéticas, tamanho reduzido, boa sensibilidade, resistência à água e a possibilidade de efectuar registos a grandes distâncias sem perdas consideráveis de informação.

Estas vantagens permitem que os sensores ópticos possuam uma utilização privilegiada em análises biológicas e químicas, na medição de contaminações ambientais, na indústria em particular na química e dos alimentos. Também são largamente utilizados na monitorização da deterioração de estruturas devido a determinados agentes causadores, designadamente iões cloretos, sulfatos, carbonatos e amónio.

São apenas referidos alguns exemplos de entre muitos outros que requerem sensores de alta sensibilidade. Acresce ainda que, o facto de não ser necessário a actuação directa na manipulação de amostras, por parte do ser humano, faz dos sensores de fibra óptica uma mais-valia.

Neste seguimento surge o interesse em estudar sensores de fibra óptica. A escolha deste tema teve como principal objectivo estudar um assunto de utilidade no ponto de vista de engenharia e cujas eventuais aplicações que dele venham a surgir possam contribuir para o desenvolvimento da ciência e tecnologia actual.

## **1.2. Organização e âmbito do trabalho**

### **1.2.1. Enquadramento e objectivo**

O presente trabalho tem como objectivo o estudo global e desenvolvimento de redes de período longo em fibra óptica (LPG). Esta investigação começou por um estudo teórico, constituindo assim uma primeira abordagem ao tema em questão. De seguida foram realizadas caracterizações de redes de período longo ao índice de refração. Com a evolução do trabalho achou-se conveniente expandir o tema, tendo sido analisadas outras vertentes tais como, o estudo de diferentes métodos de gravação e a influência de altas temperaturas.

Numa primeira análise, concluiu-se que o sistema de gravação, que o Instituto de Telecomunicações (IT) possui até à data, detém algumas limitações na gravação de LPGs. Tal deve-se à necessidade de submeter as fibras ópticas a um tratamento prévio numa atmosfera de hidrogénio, levando por um lado, a que o processo seja mais demorado e por outro lado, originando alterações no espectro final após a remoção do hidrogénio.

Como consequência, irá ser apresentado ao longo deste trabalho o processo de desenvolvimento de um método de gravação de redes por arco eléctrico com objectivo de constituir uma alternativa ao método utilizado actualmente.

Pretende-se ainda que este trabalho esteja centrado na caracterização de LPGs aos parâmetros índice de refração, deformação longitudinal e temperatura.

Para tal deverão ser usadas LPGs gravadas por UV e por arco eléctrico e redes corroídas. No caso específico da caracterização à temperatura, pretende-se comparar o desempenho de redes gravadas pelos dois métodos e principalmente, averiguar a resistência a altas temperaturas.

Finalmente, a questão da sensibilidade ao índice de refração será estudada ao detalhe com o intuito de, no futuro, desenhar sensores para diversas aplicações, nomeadamente a medição de concentração de iões.

### **1.2.2. Organização do trabalho**

O presente documento está organizado em 6 capítulos, onde são estudados os conceitos teóricos inerentes às LPGs, o seu fabrico e consequente caracterização.

No segundo capítulo é descrita uma breve perspectiva histórica do desenvolvimento da fotossensibilidade, facto que tornou possível o aparecimento das redes de período longo. Apresenta-se, ainda, um estudo sobre o estado da arte que tem como objectivo dar a conhecer os meios existentes actualmente para registar variações de índice de refração e averiguar algumas publicações que poderão contribuir para o desenvolvimento deste trabalho.

No terceiro capítulo é efectuado um estudo teórico dos conceitos relacionados com as LPGs. A sensibilidade aos parâmetros físicos, índice de refração, temperatura e deformação é analisada em detalhe na parte final do capítulo.

No quarto capítulo são descritos os métodos de produção de redes que foram usadas ao longo deste trabalho. É dado especial ênfase ao método de gravação por arco eléctrico.

No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados das caracterizações efectuadas.

Finalmente, no sexto capítulo são expostas as principais conclusões deste trabalho bem como as perspectivas que incentivam o trabalho futuro e demonstram que a área dos sensores ópticos, em particular das redes de período longo, está longe de ser considerada totalmente explorada.

## **2.1.    Perspectivas históricas**

### **2.1.1. Desenvolvimento da fotossensibilidade**

Em 1978, no Communication Research Center do Canadá, Kenneth Hill e a sua equipa utilizaram a radiação de um laser de iões de árgon, numa experiência com o intuito de estudar efeitos não lineares em fibras ópticas. Ao incidir o feixe de luz no interior de uma fibra óptica dopada com germânio, observaram que, após uma exposição prolongada, o sinal transmitido era atenuado [2]. Os investigadores verificaram também que a intensidade da luz reflectida aumentava com o tempo de duração da exposição. Concluiu-se que o aumento da reflectividade foi consequência da formação de uma estrutura cujo índice de refacção era alterado permanentemente com a mesma periodicidade que o padrão de interferência.

Este fenómeno de alteração do índice de refacção foi designado por fotossensibilidade e as redes resultantes por “redes de Hill”. Estavam dados os primeiros passos para o desenvolvimento dos sensores em fibras ópticas e, a partir desta data, diversas investigações foram levadas a cabo no sentido de conhecer e desenvolver o processo de fotossensibilidade. Todavia ainda não se estabeleceu uma teoria única que consiga explicar todos os fenómenos inerentes a este conceito.

Em 1981, Lam e Garside [3] demonstraram que a alteração da magnitude do índice de refacção dependia do quadrado da potência do laser de iões de árgon (488nm), desta forma, concluíram que intervinham dois fotões no processo.

Experiências conduzidas por Meltz e seus colaboradores [4] em 1989 resultaram em mais um avanço no conhecimento do fenómeno de fotossensibilidade. Os autores sugeriram a produção de redes de Bragg através da exposição lateral de um padrão de interferência de ultravioleta (UV), externo à fibra e focado no núcleo.

Apesar da fotossensibilidade, no início das investigações, ter sido vista como um facto promissor para produção de redes de fibra óptica, possuía, contudo, algumas limitações. Pensava-se que o fenómeno estava associado apenas a fibras dopadas com germânio. Quatro anos após as experiências de Meltz, descobriu-se que uma fibra óptica dopada com germânio e boro apresentava também variações significativas no índice de refacção [5].

Em 1993, Lemaire e colaboradores [6] desenvolveram uma técnica que consistia em submeter, numa atmosfera de hidrogénio, a fibra a altas pressões e temperaturas, o que se reflectiu num aumento da fotossensibilidade.

Como se pode facilmente verificar, ao longo de aproximadamente duas décadas, vários contributos para investigação de fibras ópticas foram realizados. Consequentemente, tal reflectiu-se no desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a gravação de redes de Bragg e da tecnologia de sensores e comunicações ópticas.

## **2.2. Desenvolvimento das redes de período longo**

Em 1996, Vengsarkar *et al.* [7] desenvolveram um novo tipo de redes em fibra óptica que designaram por redes de período longo, também conhecidas como redes de transmissão em que o período da rede está compreendido entre os 100  $\mu\text{m}$  e os 700  $\mu\text{m}$ .

À semelhança das redes de Bragg (FBG - *Fiber Bragg Grating*), estas redes apresentam uma modelação periódica do índice de refacção do núcleo de uma fibra óptica. Esta foi conseguida, numa fase inicial, por exposição de um feixe de laser KrF com um comprimento de onda de 248 nm, através de uma máscara de amplitude.

As LPGs têm vindo a ser alvo de estudo e de ampla utilização. Devido à sensibilidade das LPGs ao meio envolvente é possível a sua utilização como sensores de índice de refacção com grande sensibilidade e com uma ampla gama de operação.

Tendo como ponto de partida a vantagem das LPGs na monitorização do parâmetro físico referido, que as distingue da maioria dos sensores, será efectuado de seguida, o levantamento do estado da arte em sensores de medição do índice de refacção.



### 2.2.1. Estado da arte na medição de índice de refração

Na indústria, a medição da concentração de soluções padrão, diluições ou reacções de solubilidade é importante para o controlo de qualidade de processos industriais de forma a inspeccionar a estabilidade de um determinado processo.

O instrumento utilizado para este efeito é designado por refractómetro e o princípio de funcionamento básico deste aparelho é a reflexão interna total, permitindo a determinação do índice de refração de uma substância.

Existem alguns refractómetros usados na indústria tais como, o refractómetro de Abbe, refractómetros portáteis (*Hand Held*). Contudo, estes instrumentos não permitem uma monitorização em tempo real, já que trabalham a partir de amostras recolhidas, sendo sempre necessário que a substância em estudo seja manipulada pelo utilizador. Para substâncias perigosas tais como ácidos ou substâncias a temperaturas adversas, o contacto através do ser humano para recolha da amostra não é aconselhável sendo que um método de monitorização em que não precise de contacto físico é preferível. Os refractómetros de Abbe podem ser encontrados na indústria a partir de 6500 euros enquanto os refractómetros portáteis podem ter um custo mínimo de 35 euros.

Desde o início da década de 90 que começaram a ser utilizados sensores de Bragg em fibra óptica. A sensibilidade de uma FBG à variação de temperatura e à deformação mecânica tem sido largamente investigada.

Uma rede de Bragg em fibra óptica é sensível aos parâmetros anteriormente mencionados porém, não responde à variação do índice de refração do meio envolvente. Para usar uma FBG como sensor de índice de refração é necessário diminuir o tamanho da bainha ao longo da região que contém a rede, sendo isso possível através de um ataque químico (*chemical etch-erosion*). Alguns trabalhos têm sido realizados nesta área [8], [9], conseguindo-se resoluções na ordem dos  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ . Uma FBG sujeita a um ataque de corrosão é ilustrada na figura 1.



Figura 1: Rede de Bragg após um ataque de corrosão [10].

Como consequência do ataque químico, a resistência e a durabilidade da fibra diminuem. Liang *et al.* [10] reportam um sensor composto por duas redes de Bragg separadas a uma determinada distância  $L$  (figura 2), constituindo, assim, um interferómetro de Fabry-Pérot (FFPI – *Fiber Fabry-Pérot Interferometer*). Este sistema possui maior sensibilidade ao índice de refração quando comparado com uma rede de Bragg simples pois os picos de ressonância são mais estreitos. Os autores registaram variações no índice de refração de  $1,4 \times 10^{-5}$ .

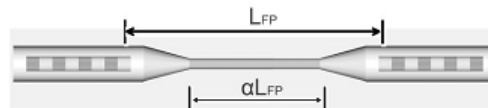


Figura 2: Interferómetro de Fabry-Pérot [10].

Sang *et al.* [11] investigaram uma nova técnica baseada na corrosão de apenas metade da zona onde está alocada a FBG. Deste modo fabricaram um sensor de índice de refração cujo desempenho não é afectado pela variação de temperatura.

Uma alternativa a este sensor é conseguida usando duas FBGs, em que uma delas, apenas, é sujeita ao ataque de corrosão. Este dispositivo foi sugerido por Dionísio Pedreira *et al.* [12] e permitiu medir simultaneamente variações de temperatura e de índice de refração de diferentes níveis de salinidade.

Com o desenvolvimento do conhecimento da fotossensibilidade nas fibras ópticas e com a investigação conduzida em torno das FBGs, os investigadores têm vindo a demonstrar interesse pelas redes de Bragg inclinadas (TFBG - *Tilted Fiber Bragg Grating*) que pertencem ao grupo das redes de período curto ( $\Lambda \sim 0,5 \mu\text{m}$ ).

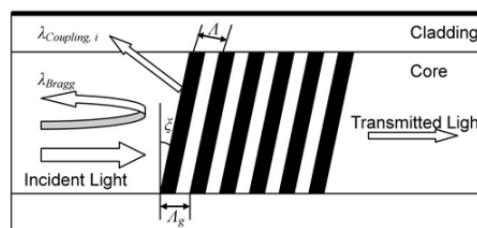


Figura 3: Diagrama de funcionamento de uma rede de Bragg inclinada [13].

Vários estudos reportam a sensibilidade destas redes ao índice de refração [14], [15]. As redes são gravadas de tal forma que a estrutura cujo índice de refração é alterado permanentemente é orientada com um determinado ângulo com o respectivo eixo do núcleo da fibra óptica,  $\xi$  (figura 3). Esta estrutura faz com que a luz que se propaga ao longo do núcleo seja desviada para a bainha, aumentando desta forma o acoplamento entre os modos propagantes do núcleo e os modos contra-propagantes da bainha, diminuindo, assim, o acoplamento na direcção contra-propagante do núcleo [13].

Quando a luz é reflectida pela estrutura de Bragg inclinada provoca o aparecimento do modo do núcleo e de vários modos da bainha. Consequentemente, aparecerão bandas estreitas de atenuação no espectro de transmissão, tal como se ilustra na figura 4 [13].

Em comparação com as LPGs, as TFBGs são mais compactas e menos sensíveis à flexão que afecta maioritariamente os modos inferiores da bainha [14]. A presença do comprimento de onda de ressonância de Bragg no espectro de transmissão permite que, as TFBGs, quando gravadas com ângulos de inclinação relativamente baixos, possam ser utilizadas como sensores de temperatura e de índice de refração. Esta propriedade desaparece gradualmente com o aumento da inclinação da rede [14].

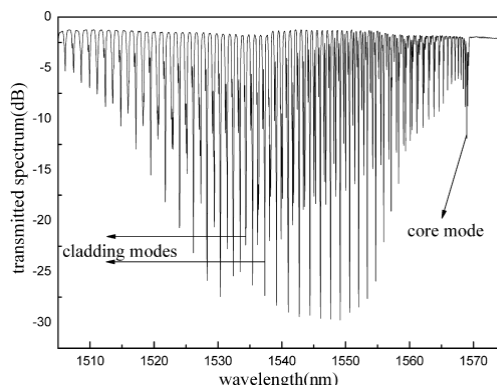


Figura 4: Espectro de transmissão de uma rede de Bragg inclinada [13].

A resolução de medida do índice de refração com este tipo de redes gravadas é da ordem dos  $10^{-4}$ , podendo esta ser melhorada pela diminuição do diâmetro da fibra através de um ataque químico de corrosão [13].

A gama de valores de índice de refração medidos depende do ângulo de inclinação. Laffont *et al.* [15] desenvolveram uma TFBG de 16 graus que possibilita a medição de variações de índice de refração entre 1,32 e 1,44. Por outro lado, Caucheteur *et al.* [14] demonstraram um sensor insensível à temperatura fabricado através de uma rede com uma inclinação de 4 graus e que possibilita a determinação de variações de índice de refração entre 1 e os 1,45 com uma resolução de  $2 \times 10^{-4}$ .

As redes de período longo superam as FBG em relação à medição do índice de refração na medida em que possuem sensibilidade ao parâmetro em causa sem que tenham de ser corroídas. Este tipo de sensores possui uma elevada sensibilidade ao índice de refração, podendo ser, facilmente, configurado para medir diferentes parâmetros [16]. Encontram-se alguns trabalhos na bibliografia [17] que demonstram o uso de LPGs como sensores capazes de diferenciar diferentes substâncias, tais como o óleo e o petróleo. Também podem ser usadas como sensores de concentração de um determinado químico.

### 2.2.2. Estado da arte de redes de período longo

Os sensores em fibra óptica possuem vantagens que os destacam e os tornam interessantes para diferentes aplicações, tais como baixas perdas de transmissão, imunidade a interferências electromagnéticas, baixo custo. Podem ser projectados para situações particulares pelo facto de constituírem sensores de dimensões muitíssimo reduzidas. Tal constitui uma vantagem em aplicações biomédicas onde, ao longo dos últimos anos, a escala da dimensão tem diminuído e a precisão tem aumentado.

Destaca-se também, a possibilidade de serem usados em ambientes aquosos, pois são à prova de água. Deste modo têm sido amplamente utilizados na indústria do petróleo e água como sensores de certificação de qualidade.

A evolução no conhecimento das LPGs tem demonstrado diferentes configurações. Um exemplo deste caso foi reportado recentemente por Jiang *et al.* [18], onde foi colocado um espelho no final da rede através de uma micro-ponta colocada no núcleo da fibra. Como resultado o espectro de transmissão é invertido e posteriormente reflectido permitindo a medição de variações do índice de refração. A monitorização do espectro em reflexão constitui uma vantagem em determinadas aplicações, tendo em conta que apenas uma das extremidades da fibra é conectada ao aparelho que permite a aquisição de dados.

Actualmente, existem já artigos publicados que referem a utilização de LPGs para a medição de iões. Através de deposição de um determinado material na rede, Ying *et al.* [19] desenvolveram um sensor capaz de medir iões de nitrito com uma sensibilidade notável. Os nitritos são utilizados na preservação de alimentos, situação que exige que o método de medição não seja tóxico e que não envolva a adição de reagentes químicos, o que poderá ser realizado através de sensores ópticos.

Na área da monitorização de estruturas, um dos objectivos tem sido o desenvolvimento de LPGs para aplicação na prevenção de corrosão. Samer *et al.* [20] compararam o desempenho de um sistema constituído por duas LPGs com uma configuração constituída por apenas uma. Obtiveram uma precisão de cerca de 6 vezes superior na variação do índice de refração na presença de iões de cloro.

É importante referir o facto de os sensores suportarem elevadas temperaturas, sendo que neste trabalho foram atingidos os 1060 °C, o que viabiliza a sua utilização em situações extremas de temperaturas. Estudos de LPGs a altas temperaturas demonstram que redes gravadas através da técnica de arco eléctrico evidenciam melhor desempenho que as restantes técnicas de gravação [21], [22], [23].

As LPGs podem ser utilizadas como sensores de curvatura, tendo particular interesse em aplicações biomédicas. Allsop *et al.* [24] demonstraram a viabilidade da monitorização do sistema respiratório.

A utilização de LPGs para medir simultaneamente diferentes parâmetros também tem sido investigada. Tendo em conta que diferentes modos de ressonância são caracterizados por sensibilidades distintas, Bhatia *et al.* [25], [26], reportam o uso de uma única LPG para medir simultaneamente temperatura e deformação.

Finalmente, para além das aplicações como sensores, as LPGs podem ser utilizadas em dispositivos na área das telecomunicações, tais como filtros espectrais [7] e equalizador de ganho de um amplificador de fibra dopada com érbio [27].

No seguimento do desenvolvimento de filtros espectrais, a equipa de investigadores Grubbs *et al.* sugeriu uma configuração baseada em duas LPGs, com a particularidade de introduzir um bloqueio entre as duas redes, o que permite apenas a transmissão dos modos acoplados da bainha para a segunda LPG com uma perda de apenas 2 dB. A leitura do espectro é realizada em reflexão.

---

## Capítulo 3. Teoria das redes de período longo

---

### 3.1. Fundamentação teórica básica

As redes em fibra óptica podem ser divididas em duas classes: as de reflexão, em que se enquadram as redes de Bragg bem como as redes de período curto (SPG -*Short Period Grating*), e as de transmissão que são as redes de período longo e os filtros Rocking.

Também é frequente dividir a classificação das redes em fibra óptica em duas classes tendo em conta o período da rede. Neste caso consideram-se as redes de Bragg e as redes de período longo. Este trabalho vai ser desenvolvido com base nas redes de período longo que têm como característica diferenciadora a ser explorada nesta tese a sensibilidade a alterações do índice de refração do meio envolvente.

Uma LPG em fibra óptica consiste, de uma forma geral, na modulação periódica das características de uma fibra ao longo do seu eixo longitudinal. Esta modulação pode ser induzida por deformação física do material da fibra ou por modulação do índice de refração do núcleo.

A estrutura gravada no núcleo de uma fibra possui um período compreendido entre os 100  $\mu\text{m}$  e 1000  $\mu\text{m}$  e permite o acoplamento do modo fundamental do núcleo para os modos co-propagantes da bainha, isto é, faz o acoplamento entre modos da mesma direcção de propagação.

Na figura 5, é representada uma LPG, e o diagrama da figura 6 descreve o modo como uma onda é propagada numa estrutura FBG e LPG, respectivamente.

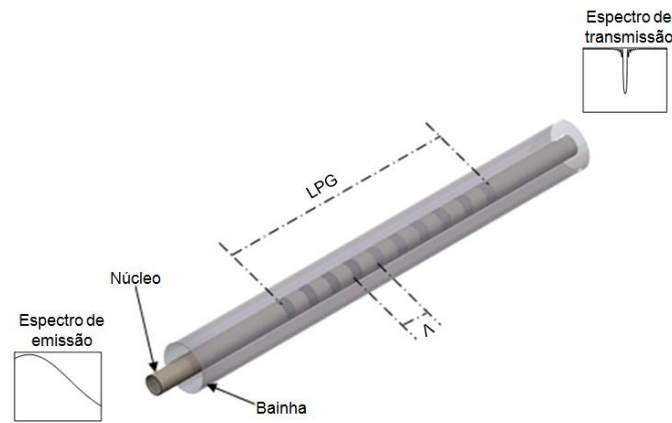


Figura 5: Representação de uma rede de período longo.

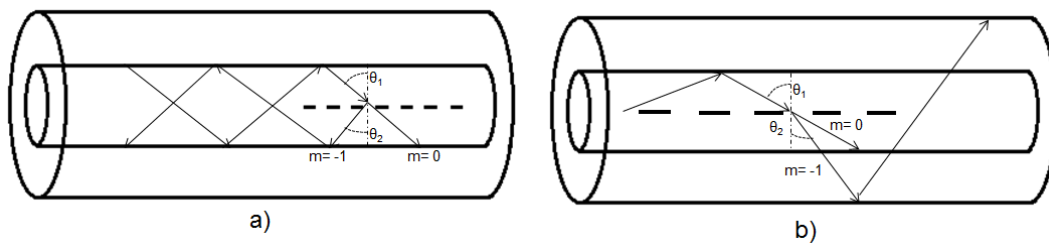


Figura 6: Ilustração geométrica representativa de a) rede de Bragg. b) rede de período longo [28] (*adaptado*).

A equação 3.1 [29], é a expressão matemática que descreve o fenómeno ilustrado na figura 7, que traduz, na sua forma mais simples, a equação que se aplica a uma rede de difracção óptica, em que a luz incidente com um ângulo  $\theta_1$  é difractada fazendo um ângulo  $\theta_2$  que depende da ordem de difracção  $m$ .

$$n \sin \theta_2 = n \sin \theta_1 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad 3.1$$

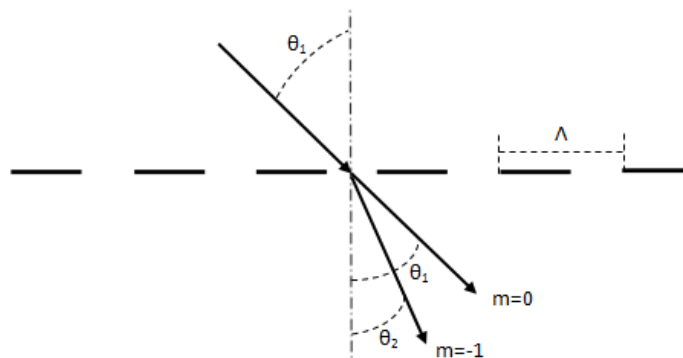


Figura 7: Diagrama geométrico da difracção de uma onda de luz numa rede.

Considere-se uma onda plana num meio dieléctrico e uniforme de índice de refracção  $n$ . Neste caso, define-se a constante de propagação ( $\beta$ ) na forma:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} \quad 3.2$$

sendo o índice de refração  $n_{\text{eff}}$  efectivo definido por:

$$n_{\text{eff}} = n \sin \theta \quad 3.3$$

De seguida, rearranjado as equações 3.1, 3.2 e 3.3 obtém-se a equação designada por condição de ressonância (*phase-matching condition*), que descreve o acoplamento dos modos específicos para uma rede de período longo. Sendo que  $\beta_{co}$  e  $\beta_{cl}^m$  são as constantes de propagação do modo do núcleo e do  $m$  modo da bainha, respectivamente.

$$\beta_{cl}^m = \beta_{co} + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad 3.4$$

Partindo novamente da equação 3.1 e da relação  $n_{\text{eff}} = n \sin \theta$ , considerando-se  $m=-1$ , obtém-se a equação 3.5. Esta expressão ilustra o acoplamento numa fibra de transmissão que produz uma série de bandas de atenuação no espectro da fibra, devido ao facto do modo da bainha ser rapidamente atenuado e cujos comprimentos de onda ressonantes ( $\lambda_{\text{res}}$ ) são soluções da equação 3.5:

$$\lambda_{\text{res}}^m = [n_{\text{eff},co}(\lambda) - n_{\text{eff},cl}^m(\lambda)]\Lambda \quad 3.5$$

Onde  $n_{\text{eff},co}(\lambda)$  e  $n_{\text{eff},cl}^m(\lambda)$  são os índices efectivos do modo fundamental do núcleo e do  $m$  modo da bainha, respectivamente. Neste caso de estudo deverá ser dado particular atenção ao factor  $n_{\text{eff},cl}^m(\lambda)$  que corresponde ao parâmetro no interior da fibra e que é influenciado pela alteração do índice do meio envolvente. Da expressão 3.5 também se conclui, no seguimento dos trabalhos efectuados por Bhatia e Vengsarkar [30], que para uma dada LPG, o período da rede determina os modos da bainha cujo comprimento de onda pode ser acoplado.

Como veremos mais em pormenor na secção de sensibilidade da fibra aos parâmetros dos quais uma LPG é dependente, o índice de refração efectivo da bainha aumenta quando o índice de refração do meio envolvente aumenta, traduzindo-se numa variação do comprimento de onda central. Esta variação é distinta para cada banda de atenuação e é função da ordem ( $m$ ) do modo da bainha correspondente.

Por sua vez, as bandas de atenuação são dependentes da quantidade de potência transferida para cada modo específico da bainha a um dado comprimento de onda de ressonância ( $\lambda_o$ ). O coeficiente de transmissão das bandas de atenuação é expresso do seguinte modo:

$$T(L) = \sin^2 (K_m L) \quad 3.6$$

onde  $L$  representa o comprimento da rede e  $K_m$  é designado por coeficiente de acoplamento, que é determinado pelo integral de sobreposição, equação 3.7, entre o núcleo e o modo específico da bainha bem como pela amplitude da modelação periódica das constantes do modo de propagação [31], e determina a força do acoplamento [32].

$$K = \frac{\omega \varepsilon_0}{4} \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^\infty r dr E_1^* \Delta n E_2 \quad 3.7$$

Nesta equação  $E_1$  e  $E_2$  correspondem à distribuição do campo transversal do núcleo e da bainha, respectivamente. O parâmetro  $\Delta n$  representa a variação total do índice de refração,  $\omega$  é a frequência óptica,  $\varepsilon_0$  é a permissividade no vácuo,  $r$  corresponde à coordenada radial e  $\phi$  representa a coordenada angular.

A relação 3.6 assume o seu valor máximo para  $K_m L = \frac{\pi}{2}$  que corresponde à situação em que toda a potência da luz que se propaga no núcleo da fibra é transmitida à bainha e assume o seu mínimo na forma:

$$T_i(L) = 1 - \sin^2(K_m L) \quad 3.8$$

Como já foi referido, através da expressão 3.5, verifica-se que o comprimento de onda de ressonância, para uma dada fibra, é dependente do período da rede. A figura 8 ilustra a dependência do comprimento de onda do acoplamento para os modos da bainha de 1 a 9 (a) e de 18 a 27 (b) em função do período da LPG.

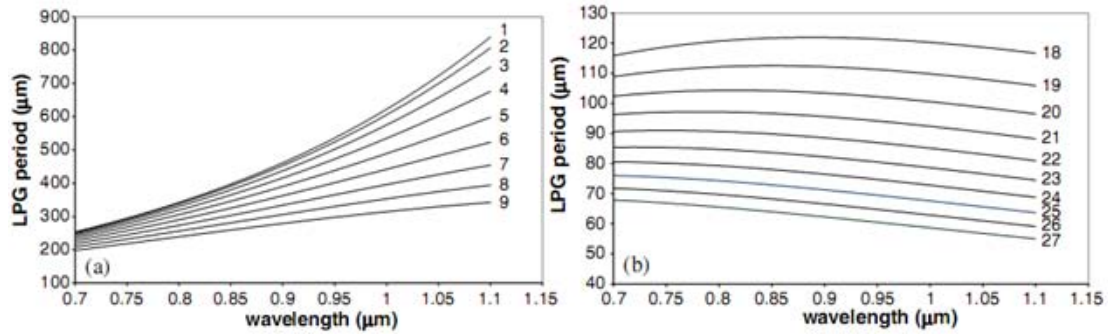


Figura 8: Simulação da resposta do comprimento de onda de ressonância em função do período, para o acoplamento entre os modos a) 1 a 9 e b) 18 a 27 [31].

Pode ser observado através da figura 8-a), que os modos de acoplamento de baixa ordem são atingidos através de períodos maiores. Através da figura 8-b), verifica-se que em alguns dos modos, mais evidente para 18, 19 e 20, o acoplamento para um modo da bainha pode ocorrer simultaneamente para dois comprimentos de onda produzindo duas bandas de atenuação [33]. Também se conclui que pequenas alterações nas condições de acoplamento podem traduzir-se em grandes separações entre duas bandas de atenuação [31].

### 3.2. Sensores de redes de período longo

A sensibilidade de uma LPG aos parâmetros que a influenciam está relacionada com o seu período, pela ordem do modo da bainha que determina o modo de ressonância e pela própria composição da fibra.



Uma LPG é sensível à deformação longitudinal, temperatura, índice de refração e curvatura. Em relação à curvatura, verifica-se que interage com os modos da bainha. Quando uma LPG é sujeita a uma curvatura, os modos da bainha são desviados para o exterior e como tal, o acoplamento é perturbado. O efeito da curvatura depende do raio de curvatura, comprimento de onda, ordem do modo, perfil do índice de refração, diâmetro da bainha e índice de refração do meio envolvente.

### 3.2.1. Sensibilidade à temperatura

A sensibilidade à temperatura pode ser analisada tendo em conta a seguinte expressão [34].

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff})} \left( \frac{dn_{eff}}{dT} - \frac{dn_{cl}}{dT} \right) + \Lambda \frac{d\lambda}{d\Lambda} \frac{1}{L} \frac{dL}{dT} \quad 3.9$$

Em que  $\lambda$  é o comprimento de onda central do vale de atenuação,  $T$  corresponde à temperatura, como vimos anteriormente  $\delta n_{eff}$  pode ser expresso sob a forma  $\delta n_{eff} = (n_{eff} - n_{cl})$ ,  $L$  é o comprimento e  $\Lambda$  é o período da LPG.

O primeiro termo da equação é designado por contribuição material, e está relacionado com a alteração do índice de refração do núcleo e da bainha derivado do efeito termo-óptico. Este termo é maioritariamente influenciado pela composição da fibra e é extremamente dependente da ordem do modo da bainha no qual ocorre o acoplamento [31].

De acordo com o mesmo artigo, para períodos superiores a 100  $\mu\text{m}$  serão observados os modos inferiores e o efeito predominante será proveniente da contribuição material. Por outro lado, para períodos inferiores a 100  $\mu\text{m}$  são observados os modos superiores e a contribuição material poderá ser desprezada [34].

O segundo termo da equação anterior é designado por contribuição do guia de ondas e está associado à alteração do período da rede devido à variação de temperatura. O sinal e magnitude deste termo estão directamente relacionados com o modo de acoplamento da bainha [31].

O efeito da variação da temperatura na alteração do período da rede ( $d\Lambda/dT$ ) pode ser desprezável em relação a alteração do índice de refração ( $dn/dT$ ) e neste caso obtém-se a aproximação [35]:

$$\frac{d\lambda}{dT} = \left( \frac{dn_{eff}}{dT} - \frac{dn_{cl}}{dT} \right) \Lambda \quad 3.10$$

Devido à forte dependência da temperatura com a contribuição material, constata-se que o deslocamento do comprimento de onda pode ser controlado através da adição de dopantes na fibra tais como trióxido de boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) que exhibe uma variação negativa do índice de refração em função da temperatura ( $dn/dT < 0$ ) [35].

A figura 9 permite observar diferentes valores de sensibilidade para quatro modos de atenuação, de A a D. Em termos de comparação, é representada na mesma figura a sensibilidade de uma FBG à temperatura, assinalada pela letra E.

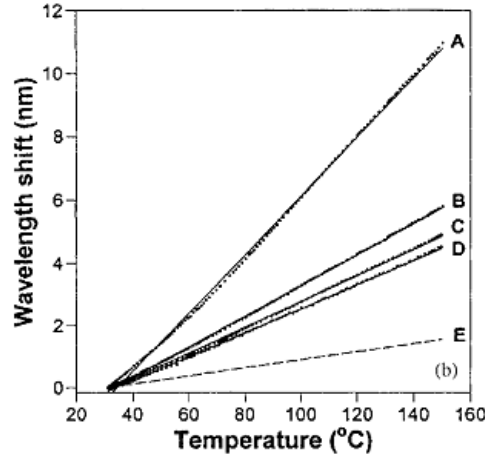


Figura 9: Sensibilidade de quatro diferentes modos de ressonância à temperatura identificados por A a D. A linha a tracejado corresponde à sensibilidade de uma FBG [31].

Conclui-se que uma escolha apropriada do período de uma LPG permite anular o resultado  $\frac{d\lambda}{dT}$  na situação em que a contribuição material tem o mesmo valor do que a contribuição do guia de onda, mas com sinal oposto. Por outro lado, é possível projectar um sensor com maior sensibilidade à temperatura ou o contrário, consoante a aplicação desejada.

### 3.2.2. Sensibilidade à deformação longitudinal

A sensibilidade à deformação longitudinal é dada pela equação 3.11.

$$\frac{d\lambda}{d\varepsilon} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff})} \left( \frac{dn_{eff}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{cl}}{d\varepsilon} \right) + \Lambda \frac{d\lambda}{d\Lambda} \quad 3.11$$

À semelhança da equação 3.9, a sensibilidade à deformação resulta da contribuição material, expressa pelo primeiro termo, e pela contribuição do guia de onda dada pelo segundo termo. O primeiro termo está relacionado, por um lado, com a alteração do comprimento da fibra, em resultado da aplicação de uma força na direcção longitudinal da fibra, e por outro lado, devido ao efeito do coeficiente de expansão óptica. O efeito do guia de ondas advém da dispersão dada pelo factor  $\frac{d\lambda}{d\Lambda}$ .

Para períodos superiores a 100  $\mu\text{m}$ , a contribuição do efeito do material é negativa enquanto o segundo termo da equação tem um valor positivo. De forma semelhante à temperatura é possível obter uma resposta positiva, nula ou negativa consoante os parâmetros da rede [34], como se pode observar no gráfico da figura 10.

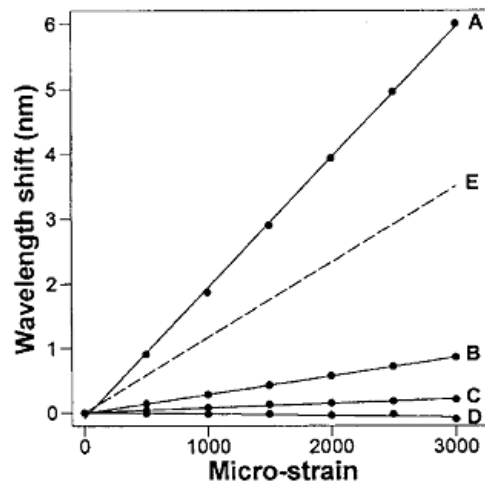


Figura 10: Sensibilidade de quatro diferentes modos de ressonância à deformação identificados por A a D. A linha a tracejada corresponde à sensibilidade de uma FBG [31].

A sensibilidade tanto à temperatura como à deformação, tal como foi explanado nesta secção, depende fortemente do modo da bainha e do período da rede. Também está patente a possibilidade de, através de uma rede com um período certo, poder obter vários modos de ressonância em que um dado modo poderá demonstrar sensibilidade à deformação e insensibilidade à temperatura e outro modo poderá evidenciar o oposto. Constitui-se assim um sensor multi-parâmetro [26].

### 3.2.3. Sensibilidade ao índice de refração

A sensibilidade ao índice de refração resulta da dependência do índice de refração do meio envolvente no índice de refração efectivo da bainha. Através da equação de ressonância (equação 3.5) pode constatar-se que a alteração do índice efectivo da bainha vai alterar o comprimento de onda de acoplamento. Por outro lado a diminuição da intensidade de um dado pico de ressonância está directamente relacionada com a diminuição do integral de sobreposição (equação 3.7).

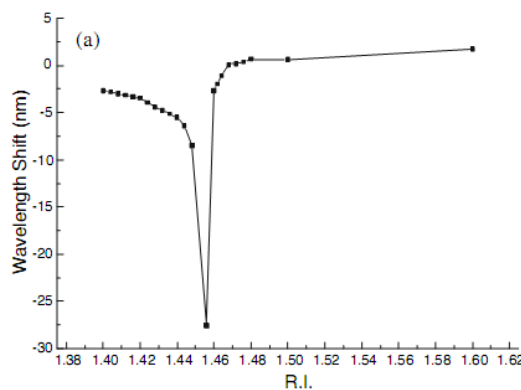


Figura 11: Gráfico do deslocamento do comprimento de onda em função do índice de refração do meio envolvente [31]

Na figura 11 poderá observar-se a resposta típica de deslocamento do comprimento de onda em função do índice de refração. A figura 12 ilustra a resposta de uma análise semelhante à anterior mas em transmissão.

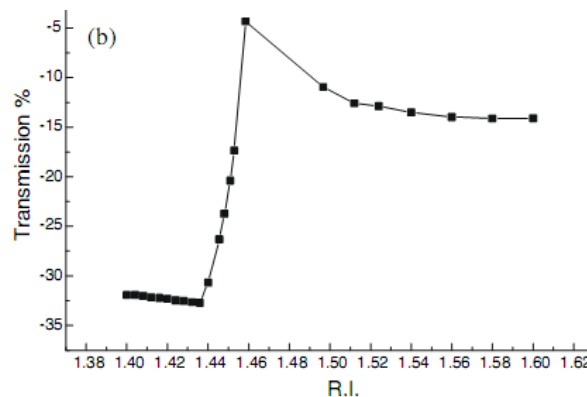


Figura 12: Gráfico do valor de transmissão de um modo de ressonância em função do índice de refração do meio envolvente [31].

Neste seguimento poderá identificar-se três fenómenos distintos que terão diferentes repercussões no espectro de transmissão.

O primeiro caso ocorre quando o índice de refração do meio circundante varia numa gama de valores inferiores ao índice de refração da bainha. Nesta situação o aumento de  $n_{eff,cl}$  provoca a diminuição do comprimento de onda de ressonância de acordo com a expressão *phase-matching condition* (equação 3.5).

O segundo caso verifica-se quando o índice de refração do meio envolvente tende para o valor do índice da bainha. Esta situação origina uma estrutura composta pelo núcleo e a bainha, podendo considerar-se a bainha uma estrutura infinita. Neste caso os modos guiados da onda desaparecem gradualmente e não se dá o acoplamento entre os modos do núcleo e os modos da bainha.

O terceiro caso ocorre quando o índice externo é superior ao valor do índice da bainha. Observa-se que o deslocamento no comprimento de onda de ressonância é menor do que no primeiro caso. Este fenómeno poderá estar associado às refrações de Fresnel na interface entre bainha e meio externo [36]. O consecutivo aumento de  $n_{ext}$  não induz alterações no comprimento de onda de ressonância mas faz com que a intensidade do modo seja menor [15].

A deposição de materiais sobre uma LPG origina diferentes respostas ao índice de refração. Vários autores [37], [38] têm vindo a publicar a utilização de LPGs com deposição de um dado substrato para medir humidade através do índice de refração.

### 4.1. Introdução

Em 1996, Vengsarkar *et al.* [7], reportaram pela primeira vez a gravação de redes de período longo utilizando o método de gravação por UV.

Com o evoluir do estudos nesta área, outros processos foram desenvolvidos, entre os quais, a fabricação através de radiação com pulsos de femtossegundos próximo do infravermelho (800 nm) [39], exposição através de um laser CO<sub>2</sub> [40], [41], e de CO [42], implantação iónica [43], difusão de dopantes no núcleo [42], [44], deformação mecânica da fibra [45] e arco eléctrico [32], [21].

De seguida serão abordados os métodos que foram usados para gravar as redes utilizadas ao longo deste trabalho, nomeadamente, por exposição de radiação UV ponto-a-ponto e por arco eléctrico.

### 4.2. Processo de hidrogenação

Na gravação de LPGs através de laser de excímero, é necessário que as fibras sejam sujeitas previamente a um processo de hidrogenação.

Para tal é utilizado a seguinte unidade de hidrogenação:



Figura 13: Unidade de hidrogenação de fibras ópticas [46]

As fibras, com um comprimento máximo de dois metros, são colocadas na câmara de alta pressão. Actualmente a pressão máxima do sistema é de 150 Bar e opta-se por efectuar a purga do sistema com hidrogénio em substituição ao árgon como era feito inicialmente.

Após a gravação da rede é necessário eliminar todo o hidrogénio da fibra o que leva a alterações no espectro de transmissão. Estas alterações dependem da taxa de hidrogénio que a fibra absorveu previamente. Para efectuar a remoção do hidrogénio, a fibra é colocada numa câmara térmica a uma temperatura de 70 °C durante aproximadamente 24 horas.

### 4.3. Gravação por laser UV

A gravação por intermédio de laser UV, sugerida por Vengsarkar, foi inicialmente proposta utilizando a configuração a partir de máscara de amplitude segundo o seguinte esquema:

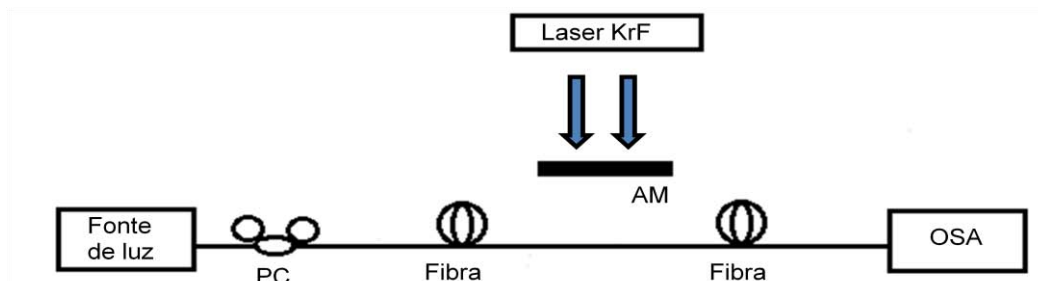


Figura 14: Configuração da fabricação de LPGs através de radiação UV. AM: máscara de amplitude e PC: controlador de polarização [7] (*adaptado*).

Com esta configuração, o feixe laser incide na fibra óptica através de uma máscara de amplitude, designada por AM (*amplitude mask*) na figura 14, produzindo a alteração no índice de refração do núcleo de aproximadamente  $5 \times 10^{-4}$  [7].

Nessa experiência foram usadas fibras dopadas com germânio hidrogenadas. Após a gravação da rede, a fibra foi colocada num forno por algum tempo a uma temperatura de 150 °C. Como resultado final, obtiveram-se sensibilidades que variavam entre os -0,7 e 1,5 nm/mε [7] para a deformação mecânica longitudinal, sendo que, esta gama de valores indicia uma dependência bastante acentuada da sensibilidade à deformação com o tipo de fibra usada, e de 0,04 a 0,05 nm/°C para a temperatura [7].

Utilizando a mesma fonte de energia, também é possível gravar LPG através de uma técnica designada por ponto-a-ponto. A figura 15 [47] permite comparar os dois procedimentos de gravação.

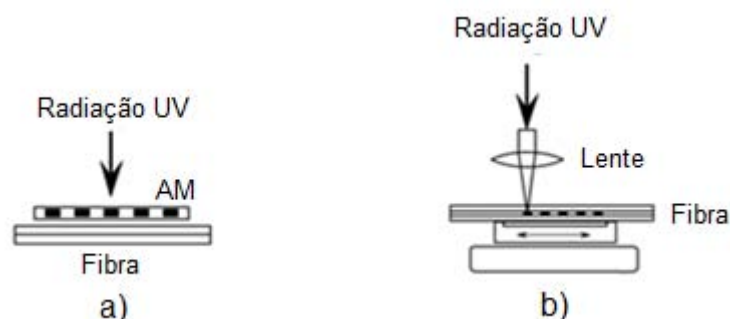


Figura 15: Gravação de LPGs através de laser UV por a) máscara de amplitude e b) ponto-a-ponto [47] (*adaptado*).

No caso da figura b, a gravação é efectuada fazendo passar a radiação UV através de uma lente convergente, originando um feixe de pequenas dimensões. Este é focado no núcleo de uma fibra sendo que a dimensão do diâmetro do feixe que incide na fibra óptica é controlada por um componente óptico designado por *slit*.

Esta tecnologia é mais flexível uma vez que a estrutura é produzida de forma sequencial, porém, oferece menor precisão do que a gravação por máscara de amplitude. Em geral, a gravação de laser UV com máscara de amplitude, tem a vantagem de ser uma técnica de fabrico rápido de redes e tem como desvantagem o facto do período da rede estar limitado à máscara de amplitude utilizada.

Ambas as técnicas de gravação por radiação UV têm revelado a necessidade de que as fibras sejam previamente sujeitas a uma atmosfera de hidrogénio.

O tratamento térmico constitui também uma desvantagem porque após a remoção do hidrogénio, os comprimentos de onda dos modos de ressonância sofrem um deslocamento que é difícil de calcular previamente mas que por vezes poderá chegar aos 50 nm.

Após a gravação de uma LPG é possível recorrer a um procedimento complementar que permite aumentar e deslocar o comprimento de onda central das bandas de atenuação. Para este efeito, a fibra é sujeita a um ataque de corrosão na zona

onde está gravada a LPG que, consequentemente, diminui o diâmetro da bainha e altera o índice efectivo do modo específico da bainha. Estudos com base neste procedimento têm vindo a ser realizados com o intuito de melhorar a sensibilidade das LPG, com grande importância na área dos sensores. Serão analisados os resultados de um ataque químico na secção 5.

A gravação de LPGs com exposição UV é a técnica mais utilizada [31], e provavelmente a mais conhecida, por ser amplamente usada na fabricação de FBGs.

#### 4.3.1. Descrição do sistema de gravação

A configuração do sistema de gravação por ponto-a-ponto pode ser observada no seguinte diagrama:

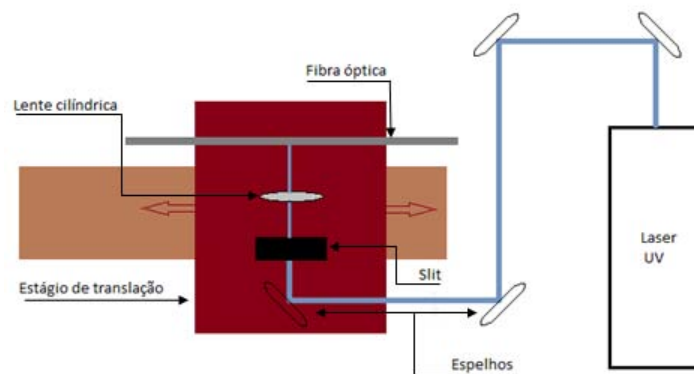


Figura 16: Diagrama ilustrativo do sistema de gravação pelo método de exposição de laser UV ponto-a-ponto.

O sistema de gravação é constituído genericamente por um laser, estágios de elevada precisão, um conjunto óptico de direccionamento de feixe formado por espelhos, uma fenda óptica (*slit*) e uma lente cilíndrica. A fibra óptica é fixa a um suporte através de garras magnéticas e mantém-se imóvel durante a gravação. A informação em detalhe de cada um destes componentes, bem como do método de gravação poderá ser consultada na referência [48].

O feixe é direccionado por intermédio de espelhos e passa através de uma *slit*, cuja abertura é definida como sendo metade do período da rede. Por fim o feixe atravessa uma lente cilíndrica convergente que permite focá-lo num ponto da fibra óptica.

O estágio de translação está ligado a um computador que controla o tempo de exposição em cada ponto e o seu deslocamento o qual, em última análise, irá definir o período da rede.

Todo o sistema descrito anteriormente está montado sobre uma mesa óptica, que se encontra suspensa através de ar comprimido para minimizar as perturbações mecânicas.



#### 4.4. Gravação através de arco eléctrico

Na sequência da investigação de novas técnicas de fabricação de LPGs foi sugerida a gravação por arco eléctrico [21], [32]. Nesta técnica não é utilizada radiação UV para gravação, o que veio diminuir os custos em relação às técnicas convencionais que utilizavam este tipo de radiação. Tal prende-se com o facto de não ser necessária a utilização de máscaras de amplitude ou de fibras especiais e até mesmo de lasers que encarecem o processo de fabricação de LPGs. Como desvantagem esta técnica não permite um controlo perfeito sobre o processo.

Foram sugeridas diferentes configurações para a gravação de LPGs, por exemplo, Palai *et al.* [32] demonstrou um processo em que aplicava periodicamente um arco eléctrico numa fibra de modo simples (Corning SMF-28) usando para tal uma máquina comercial de fusão. Durante a experiência não foi aplicada qualquer tensão mecânica na fibra a fim de garantir que não ocorressem deformações.

Mais uma vez, na tentativa de explicar o fenómeno que era responsável pela alteração do índice de refração e o consequente acoplamento entre os modos surgiram diversas teorias, entre as quais, modificações no diâmetro da fibra, difusão de dopantes, e alteração das propriedades locais da fibra devido ao rápido aquecimento/arrefecimento provocado pela descarga eléctrica [21].

Estes investigadores verificaram que o índice de refração induzido aumentava com o aumento da corrente do arco eléctrico e com o tempo de exposição. Por exemplo, para uma corrente de 11,5 mA e para uma exposição de 0,4 segundos foi induzida uma perturbação de  $2,45 \times 10^{-4}$ , enquanto, para o mesmo tempo de exposição mas para uma corrente de 11,0 mA a perturbação equivalente foi de  $1,55 \times 10^{-4}$  [32]. Outro facto importante constatado foi que, para este processo de gravação, o comprimento de onda de ressonância para o acoplamento do modo específico da bainha apenas dependia do período da rede [32].

##### 4.4.1. Descrição do sistema de gravação

O sistema de gravação foi montado sobre uma mesa da óptica da empresa TMC que se encontra suspensa através de ar comprimido com o objectivo de minimizar as perturbações mecânicas.

O esquema de funcionamento e a montagem experimental podem ser observados nas figuras 17 e 18.

O segmento da fibra ao qual foi removido o revestimento é colocado entre os eléctrodos de uma máquina de fusão da marca Fujikura FSM-405. Uma das extremidades é fixa a um posicionador da Newport com resolução de 0,5  $\mu\text{m}$ , enquanto a outra extremidade desliza ao longo de uma roldana e está presa a uma massa de 7 g que mantém a tensão constante.

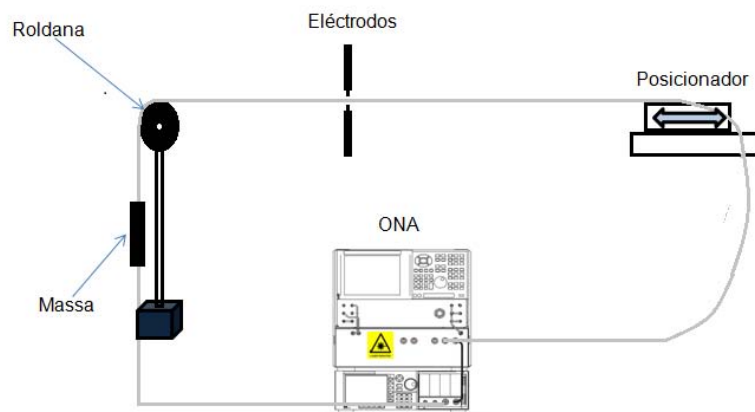


Figura 17: Diagrama ilustrativo do sistema de gravação pelo método de arco eléctrico.

O sistema de leitura utilizado é constituído por um ONA (*Optical Network Analyzer*) que permite a obtenção do espectro da LPG em tempo real. O ONA possui um laser interno cujo sinal emitido é conduzido ao longo da fibra óptica e por sua vez irá interferir com os planos que constituem a rede de período longo. A extremidade oposta da fibra está conectada a um módulo do aparelho que possibilita a aquisição do espectro de transmissão.



Figura 18: Montagem experimental do sistema de gravação por arco eléctrico.

A duração e corrente do arco eléctrico são parâmetros configuráveis a partir da máquina de fusão. O período é definido pelo controlador do posicionador. Este sistema de gravação consiste na aplicação de um arco eléctrico, movimentação da fibra na direcção longitudinal através de um período definido previamente e nova aplicação de um arco eléctrico. O crescimento da LPG é monitorizado pelo ONA.

As redes gravadas através deste método, e utilizadas durante este trabalho, foram simuladas pelo software Optigrating na versão 4.2. Os espectros ópticos são obtidos de

acordo com o método da matriz transferência baseado na teoria dos modos acoplados [28].

Na tabela seguinte podem ser encontrados os parâmetros utilizados na simulação, que melhor ajustam os resultados experimentais.

Tabela 1: Parâmetros considerados nas simulações

Tipo de rede	Fotossensível
Período ( $\mu\text{m}$ )	680
Comprimento da rede ( $\mu\text{m}$ )	25000
Índice de modulação	0,00048
Raio do núcleo ( $\mu\text{m}$ )	3,8
Raio da bainha ( $\mu\text{m}$ )	62,7

A figura 19 permite comparar o espectro experimental obtido após a gravação com o espectro simulado de uma rede com o período de 680  $\mu\text{m}$ .

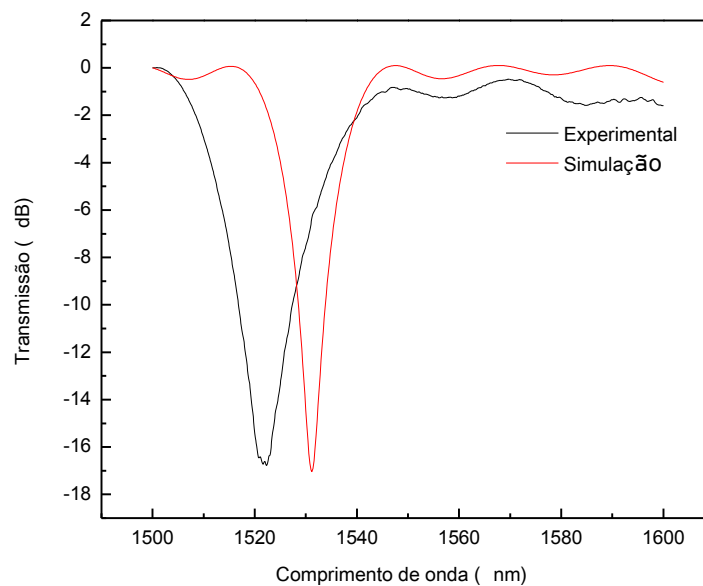


Figura 19: Espectro de uma LPG gravada por arco eléctrico e simulada através do Optgrating.

A diferença entre os espectros deve-se à dificuldade de prever com exactidão qual a modulação induzida no índice de refração do núcleo. Os dados obtidos experimentalmente apresentam, também, alguma variação. Tal acontece porque o arco eléctrico não possui uma intensidade constante e a fibra não assume sempre a mesma posição quando colocada entre os eléctrodos. Na simulação foram seleccionados apenas os primeiros dez modos pois, para períodos maiores do que 100  $\mu\text{m}$ , são acoplados os modos inferiores [31].

O efeito provocado pelo tempo de exposição do arco eléctrico foi analisado. Verificou-se que para tempos de arco eléctrico superior a 0,2 s são visíveis danos ao longo da fibra óptica e como consequência esta torna-se menos resistente. Observa-se o mesmo fenómeno para valores de potência superiores a 20 bit com o tempo de exposição de 0,2 s.

Na figura 20, é apresentada a imagem de uma fibra sem revestimento antes e após a gravação com um tempo de exposição de 0,4 s e uma potência de 6 bit.

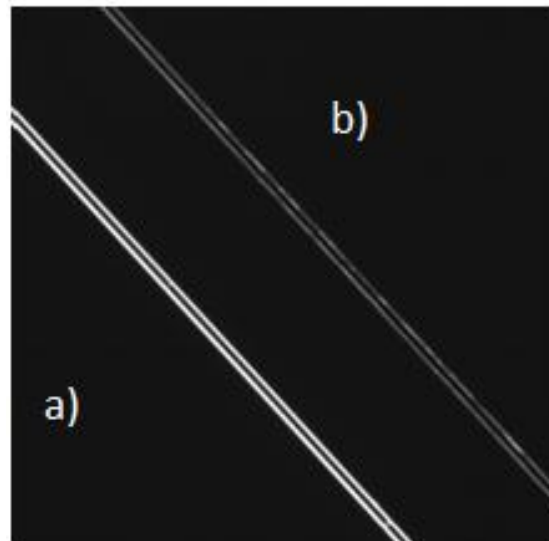


Figura 20: Fibra óptica sem revestimento a) antes da gravação e b) após a gravação.

É possível observar na imagem b, que o arco aplicado induz danificações periódicas ao longo da bainha da fibra. Este fenómeno está relacionado com a potência do arco e com o tempo de exposição. Como consequência, diferentes acoplamentos poderão ser favorecidos e modos de ressonância que não são esperados poderão aparecer. A equipa de investigadores Smietana *et al.* [49] publicou um artigo no qual referem um fenómeno semelhante observado em redes gravadas por exposição UV e por laser de CO<sub>2</sub>.

## 5.1. LPGs gravadas através laser UV (@248nm)

### 5.1.1. Sensibilidade ao índice de refração

Os ensaios à sensibilidade de LPGs ao índice de refração foram efectuados de acordo com a figura 21.

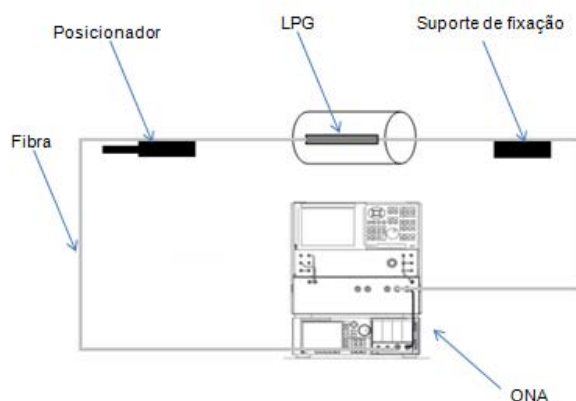


Figura 21: Montagem experimental para a realização de ensaios ao índice de refração.

Uma extremidade da fibra é fixa ao suporte e a outra é fixa a um posicionador manual que vai permitir o deslocamento da fibra durante os ensaios de deformação. A fibra é colada na suas extremidades de tal modo que a LPG fique situada no interior do suporte que irá conter a soluções a serem medidas, figura 22. A entrada e saída das soluções é realizada pela parte superior do tubo.

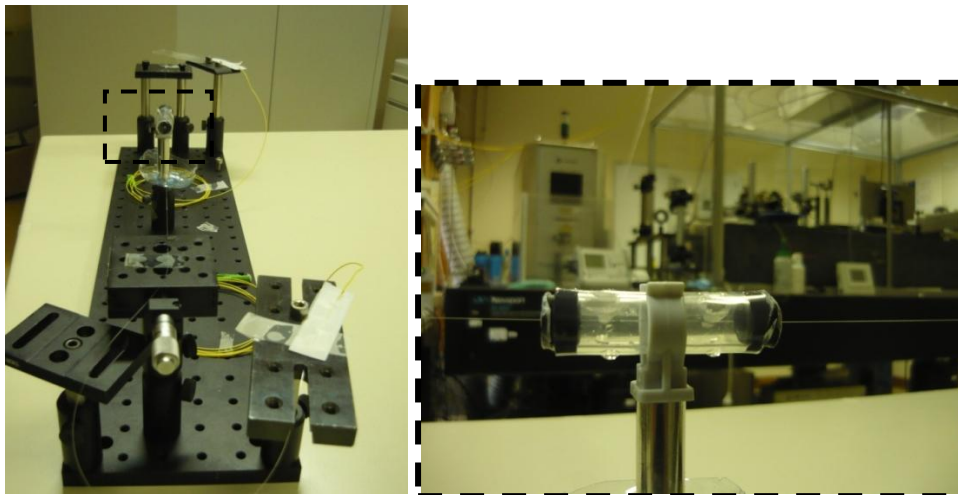


Figura 22: Suporte experimental para a realização de ensaios ao índice de refacção.

De acordo com a descrição efectuada na secção 3.2.3, o acoplamento dos modos da bainha está directamente dependente do índice de refacção do meio envolvente.

A figura 23 permite observar a dependência dos vários modos com a grandeza física referida. Cada linha representa uma determinada solução cujo valor de índice de refacção é identificado na legenda do gráfico. A informação referente aos parâmetros de gravação das redes utilizadas durante todo o trabalho encontra-se no apêndice A, encontrando-se estas catalogadas com o acrónimo LPG.

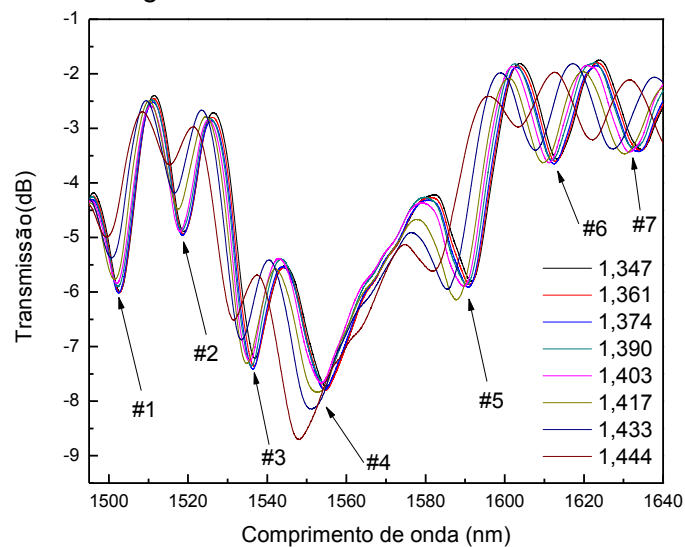
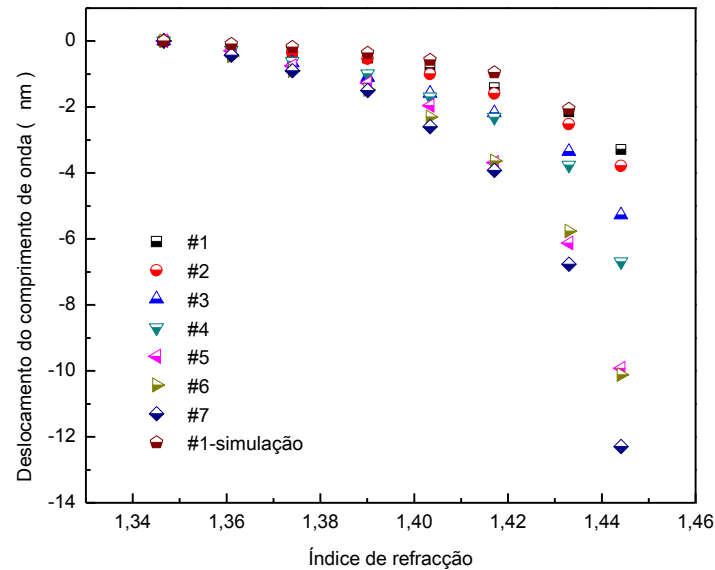


Figura 23: Espectro da variação do comprimento de onda para diferentes índices de refacção a tensão constante, LPG1.

Os índices de refacção correspondem à variação da concentração de soluções de glicerina entre os 10% e o 80%, e foram registados com um refractómetro de Abbe da marca Krüss com a precisão de 0,001. Poderá notar-se que o aumento do índice de refacção provoca a diminuição do comprimento de onda em todos os modos.

O mesmo não deverá ser referido em relação à variação da potência. De acordo com os três primeiros modos o valor da potência diminui com o incremento do índice de refração porém, para #4, observa-se o oposto.

Com o objectivo de analisar o efeito da variação do índice de refração em cada modo específico da bainha efectuou-se o gráfico da figura 24. Os ensaios foram realizados num ambiente de temperatura controlada e a tensão aplicada foi mantida constante.



**Figura 24: Caracterização de uma LPG gravada por laser UV ao índice de refração, LPG1. Os parâmetros de simulação encontram-se na tabela 1 da secção 4.4.1.**

Relacionando a expressão 3.5 introduzida na secção 3.1 com o gráfico da figura 24, verifica-se o aumento do deslocamento do comprimento de onda em função do incremento do índice de refração exterior, apontando para uma concordância entre os resultados experimentais e os esperados pela teoria. Os valores máximos de sensibilidade ocorrem quando o índice de refração do meio envolvente se aproxima gradualmente do índice da bainha. De acordo com o mesmo gráfico também é observado um maior valor de sensibilidade para modos superiores.

Quando o índice de refração da solução tende para o valor do índice da bainha origina uma estrutura composta por “núcleo - bainha” e como consequência não existem modos discretos de ressonância. Experimentalmente observa-se um valor aproximadamente nulo para o espectro de transmissão.

Finalmente, calculou-se o ajuste exponencial a cada modo com os coeficientes de correlação de 0,9955; 0,9976; 0,9867; 0,9825; 0,9966; 0,9875; 0,9892; respectivamente do modo 1 ao modo 7. Os resultados evidenciam um ajuste adequado e as equações são descritas do seguinte modo:

Modo: #1	$\lambda_{\#1} = -7 \times 10^{-20} e^{\frac{RI}{-0,032}} + 0,10$	5.1
Modo: #2	$\lambda_{\#2} = -2 \times 10^{-19} e^{\frac{RI}{0,033}} + 0,16$	5.2
Modo: #3	$\lambda_{\#3} = -1 \times 10^{-18} e^{\frac{RI}{0,034}} + 0,1$	5.3
Modo: #4	$\lambda_{\#4} = -1 \times 10^{-24} e^{\frac{RI}{0,025}} - 0,1$	5.4
Modo: #5	$\lambda_{\#5} = -2 \times 10^{-23} e^{\frac{RI}{0,027}} + 0,1$	5.5
Modo: #6	$\lambda_{\#6} = -2 \times 10^{-24} e^{\frac{RI}{0,025}} - 0,1$	5.6
Modo: #7	$\lambda_{\#7} = -4 \times 10^{-27} e^{\frac{RI}{0,023}} - 0,2$	5.7

### 5.1.2. Sensibilidade à deformação longitudinal

Os ensaios da sensibilidade à deformação foram efectuados fixando uma das extremidades da fibra ao suporte de fixação e a outra extremidade ao posicionador manual.

Neste caso houve um especial cuidado ao verificar se a fibra estava imóvel para eliminar quaisquer deslocamentos que pudessem alterar as medidas. De forma semelhante aos ensaios do índice de refração analisados anteriormente, a sala na qual as medidas foram efectuadas encontrava-se em ambiente de temperatura controlado.

Os resultados dos ensaios à deformação realizados com a LPG com ar como meio envolvente são mostrados na figura 25.

Foi calculado o ajuste linear aos valores experimentais do primeiro ensaio do qual se obteve uma recta com o coeficiente de correlação de 0,9925. Este valor comprova a linearidade dos resultados e o gráfico demonstra a reprodutividade dos mesmos durante os dois ensaios efectuados.

Através do declive da recta, calcula-se a sensibilidade do sistema à deformação. O valor obtido foi  $S_D = 0,50 \pm 0,01 \text{ pm}/\mu\epsilon$ , que constitui cerca de metade da sensibilidade de uma FBG.



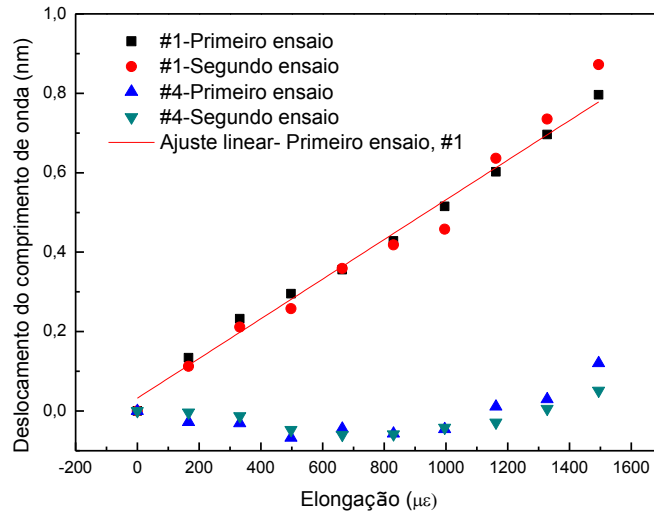


Figura 25: Caracterização de uma LPG gravada por laser UV à deformação, LPG1.

### 5.1.3. Sensibilidade à temperatura

O efeito da temperatura nos vários modos de uma LPG gravada através de laser UV foi igualmente estudado.

Os ensaios foram realizados numa câmara térmica. Foi analisada a resposta espectral de uma rede com período de 430  $\mu\text{m}$  na gama de variação de 20  $^{\circ}\text{C}$  a 80  $^{\circ}\text{C}$  com incremento de 10  $^{\circ}\text{C}$ . O espectro foi monitorizado através do ONA com uma resolução de  $9,1 \times 10^{-3}$  nm e os resultados encontram-se na figura 26.

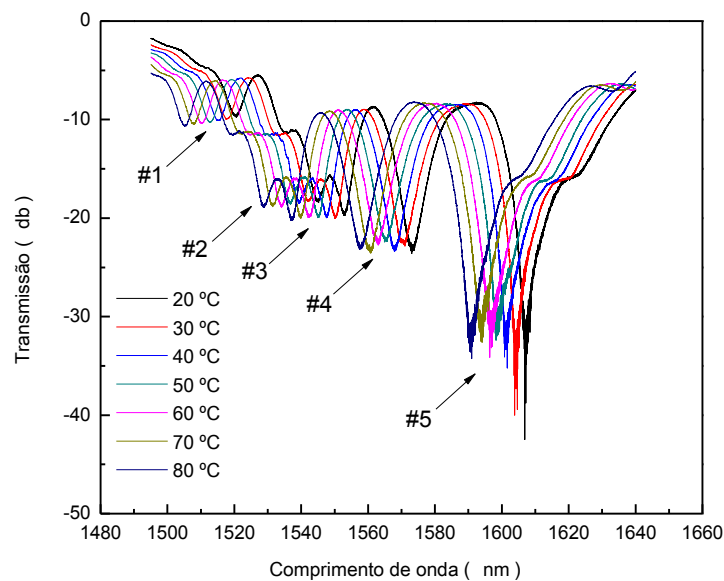


Figura 26: Espectro da variação do comprimento de onda para diferentes temperaturas, LPG2.

Uma vez mais, caracterizou-se o comportamento individual de cada modo em resultado da variação do parâmetro físico em causa e os resultados obtidos apresentam-se na figura 27.

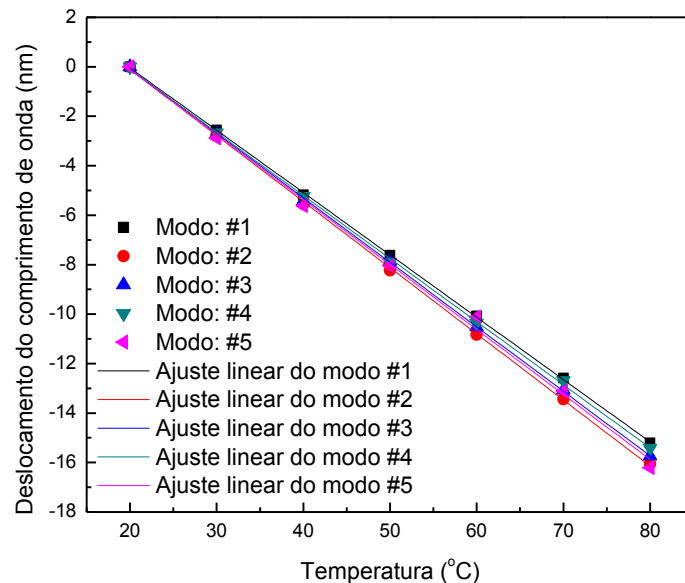


Figura 27: Caracterização de uma LPG gravada por laser UV à temperatura, LPG2.

Foi analisado na secção 3.2.1 o efeito da temperatura de um determinado modo específico de acoplamento, dado pela expressão 3.9. Os resultados relatados na literatura divergem em relação ao sinal da sensibilidade. Portanto, prevê-se que estudos futuros nesta área possam dar uma resposta mais adequada ao comportamento obtido, muito embora se admita que o factor dominante subjacente ao sinal da sensibilidade esteja ligado à composição da fibra.

De acordo com a equipa de investigadores Han *et al.* [35] a explicação da variação do comprimento de onda para valores inferiores em função da temperatura está relacionada com a presença de dopantes de boro.

Esta explicação está concordante com os resultados obtidos na medida que a fibra utilizada é a PS 1250/1500 da *Fibercore* dopada com boro e germânio.

Na secção 5.1.1, verifica-se que os modos superiores de ressonância são caracterizados por um maior valor de sensibilidade ao índice de refração. No caso da dependência com a temperatura o mesmo não se observa, ou seja, não existe uma relação visível entre os cinco modos de ressonância monitorizados na figura 27.

Os valores do declive das rectas de ajuste linear obtidos variam entre  $S_T = -0,252 \pm 0,002 \text{ nm/}^\circ\text{C}$  e  $S_T = -0,267 \pm 0,002 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ . Os coeficientes de correlação são de 0,9999 e 0,9998, respectivamente, e confirmam a opção do ajuste linear realizado.

Atendendo à alta sensibilidade à temperatura e à baixa sensibilidade à deformação, evidenciado nos dados da figura 25, faz com que as LPGs gravadas por laser UV, com períodos de cerca de 400  $\mu\text{m}$ , sejam particularmente interessantes para

aplicação em sensores de temperatura. A sua monitorização não será influenciada significativamente por pequenas variações de deformações que sejam aplicadas.

## 5.2. LPGs gravadas por arco eléctrico

### 5.2.1. Sensibilidade ao índice de refração

Utilizando o suporte da figura 22, efectuou-se a caracterização de uma LPG gravada através de arco eléctrico ao índice de refração. As medidas são mostradas na figura 28.

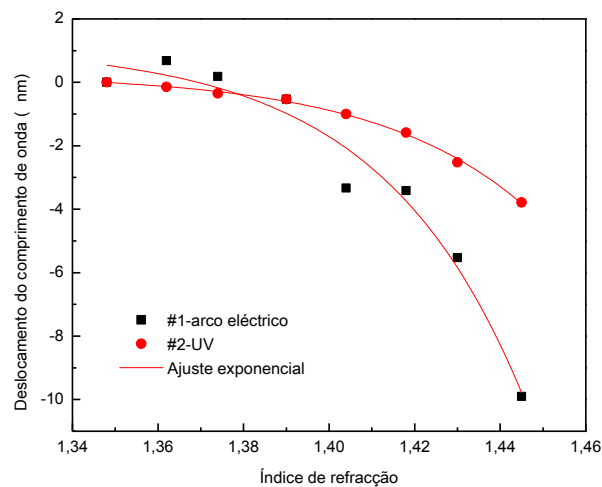


Figura 28: Caracterização de uma LPG gravada por arco eléctrico e por UV ao índice de refração, LPG5 e LPG1, respectivamente.

Um dos objectivos pretendidos neste trabalho consiste na comparação entre os dois métodos de gravação de LPGs. Na figura é mostrado o modo #2 da rede analisada na secção 5.5.1, que determina o ajuste exponencial com um melhor coeficiente de correlação.

Pode verificar-se que a sensibilidade da LPG gravada por arco eléctrico é consideravelmente superior à LPG escrita por laser UV contudo o coeficiente de correlação de 0,961 não evidencia o melhor ajuste das redes em causa.

### 5.2.2. Sensibilidade à deformação

Os resultados da caracterização da sensibilidade à deformação podem ser observados na figura 29. Verifica-se que o método de gravação por arco eléctrico, uma vez mais, aparenta demonstrar maior sensibilidade embora os resultados não apresentem um comportamento de linearidade como seria de esperar.

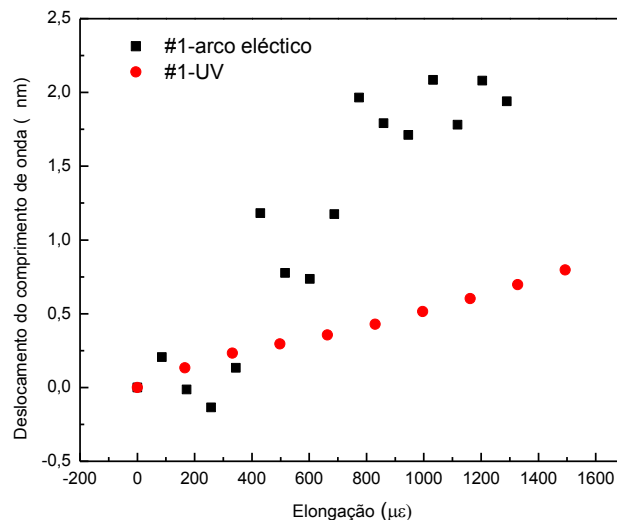


Figura 29: Caracterização de uma LPG gravada por arco eléctrico e por UV à deformação, LPG5 e LPG1, respectivamente.

### 5.2.3. Sensibilidade à temperatura

A dependência da temperatura foi estudada com base na configuração descrita na secção 5.1.3 e os resultados são mostrados na figura 30.

O gráfico da figura 30 revela que o desvio do comprimento de onda em função da temperatura para ambas as redes tem um efeito linear. A sensibilidade da LPG gravada por arco eléctrico é superior à LPG gravada por laser UV e o seu valor é de  $S_T = -0,365 \pm 0,001 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . A recta de regressão linear apresenta um coeficiente de correlação de 0,9999 que também é superior aos coeficientes calculados na secção 5.1.3.

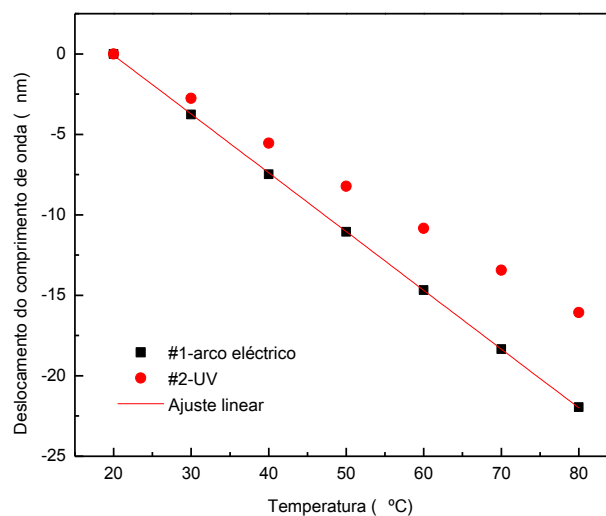


Figura 30: Caracterização de uma LPG gravada por arco eléctrico e por UV à temperatura, LPG5 e LPG2, respectivamente.

Estes resultados apontam uma vez mais para a notável linearidade entre a variação de comprimento de onda e temperatura. Conclui-se que ambos os métodos evidenciam uma resposta adequada na monitorização deste parâmetro físico e que a selecção da rede para a aplicação como sensor terá por base a taxa de deslocamento de comprimento de onda consoante a aplicação que se pretende.

### 5.3. Corrosão de redes gravadas através de laser UV

A corrosão da LPG foi realizada numa haste utilizando ácido fluorídrico (HF) a uma concentração de aproximadamente 40% durante 30 minutos. O efeito deste procedimento no espectro de transmissão de uma LPG pode ser observado na figura 31.

Ao diminuir o diâmetro da fibra aumenta-se a interacção do campo evanescente com o exterior. Experimentalmente, observa-se que a corrosão originou o deslocamento do modo central em cerca de 50 nm e aumentou a intensidade do modo central de ressonância em aproximadamente 3 dB.

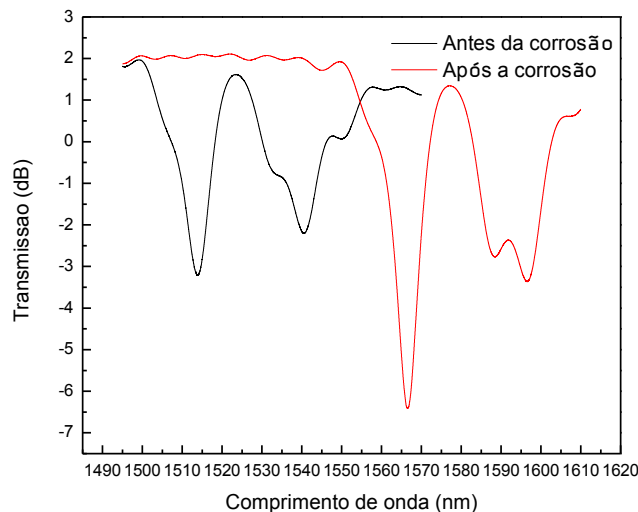


Figura 31: Espectro de comparação de uma LPG antes e após a sua corrosão, LPG3.

#### 5.3.1. Sensibilidade ao índice de refração

No âmbito da caracterização da sensibilidade ao índice de refração foram efectuados ensaios antes e após a corrosão, figura 32. A tensão e temperatura foram parâmetros mantidos constantes ao longo da experiência.

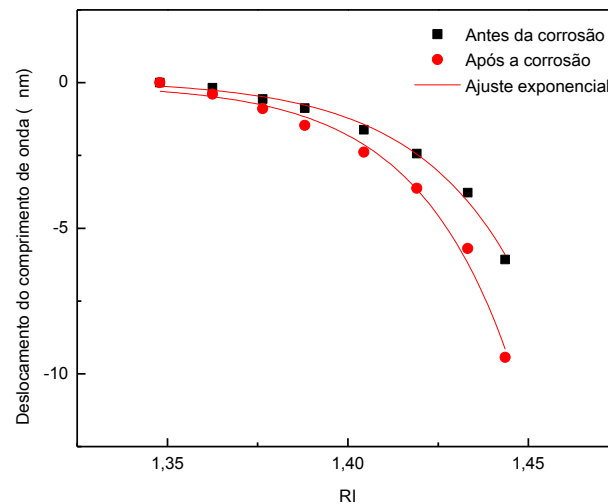


Figura 32: Caracterização ao índice de refração de uma LPG antes e após o ataque químico, LPG3.

Verifica-se o aumento da sensibilidade da rede após a corrosão. Consta-se igualmente que a diferença no deslocamento do comprimento de onda aumenta gradualmente para valores maiores de índice de refração.

A expressão de ajuste aos valores experimentais da LPG3 antes de ser realizada a corrosão é expressa da seguinte forma:

$$\lambda = -7 \times 10^{-22} e^{\frac{RI}{0,029}} + 0,1 \quad 5.8$$

Após a corrosão o ajuste exponencial assume a forma:

$$\lambda = -2 \times 10^{-23} e^{\frac{RI}{0,027}} - 0,1 \quad 5.9$$

### 5.3.2. Sensibilidade à deformação

Na sequência das caracterizações que têm vindo a ser estudadas, compararam-se os dados obtidos dos ensaios à deformação da secção 5.1.2 com os resultados da LPG corroída que são mostrados na figura 33.

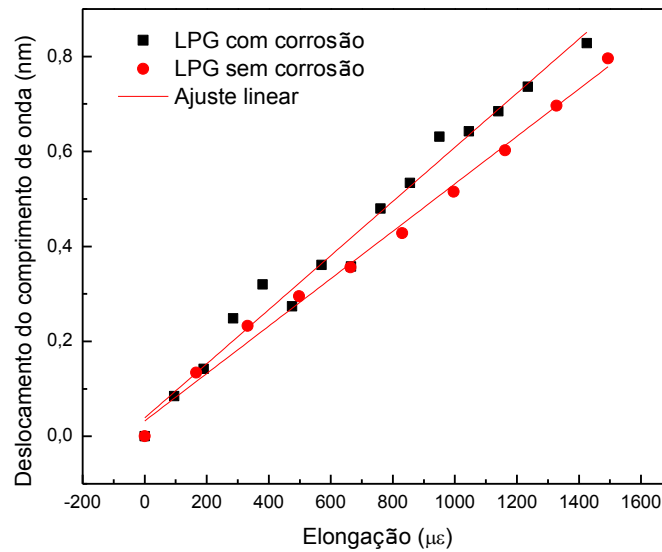


Figura 33: Caracterização de uma LPG corroída e normal à deformação, LPG3 e LPG1 respectivamente.

A sensibilidade obtida para a LPG corroída foi  $S_D = -0,57 \pm 0,02 \text{ pm}/\mu\epsilon$  e através do gráfico pode afirmar-se que a corrosão de uma LPG tem influência na dependência com a elongação.

### 5.3.3. Sensibilidade à temperatura

Os ensaios à temperatura foram realizados numa câmara térmica. Um exemplo das medidas experimentais obtidas pode ser observado na figura 34.

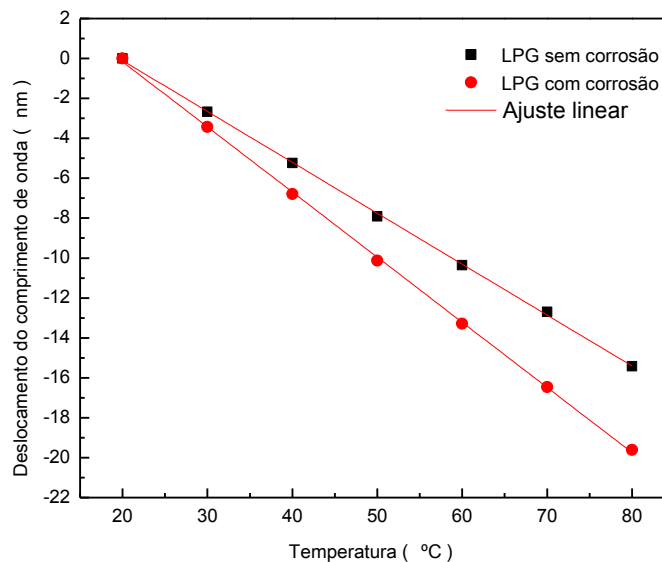


Figura 34: Caracterização de uma LPG corroída e normal à temperatura, LPG3 e LPG2 respectivamente.

Com os valores experimentais das redes gravadas por laser UV, efectuaram-se os ajustes lineares com os coeficientes de correlação de 0,9996 para a LPG3 e de 0,9995

para a LPG2, que demonstram um bom padrão de linearidade à temperatura. O valor da sensibilidade obtido para a LPG3 foi de  $S_T = -0,326 \pm 0,003 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  e para a LPG2 foi de  $S_T = -0,255 \pm 0,002 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ .

Conclui-se que a sensibilidade da rede corroída é maior, muito embora, através dos resultados analisados na secção 5.2.3, poderá verificar-se que o maior valor da sensibilidade é obtido pela rede gravada por arco eléctrico.

## 5.4. Caracterização de LPGs a altas temperaturas

### 5.4.1. Redes gravadas por UV

Para a realização dos ensaios a altas temperaturas utilizou-se a montagem esquematizada no diagrama da figura 35.

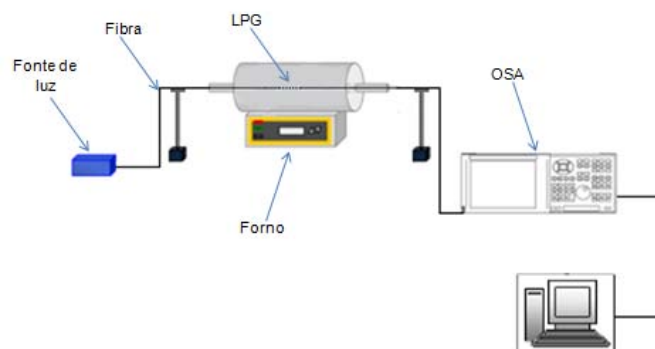


Figura 35: Diagrama da montagem de ensaios a altas temperaturas.

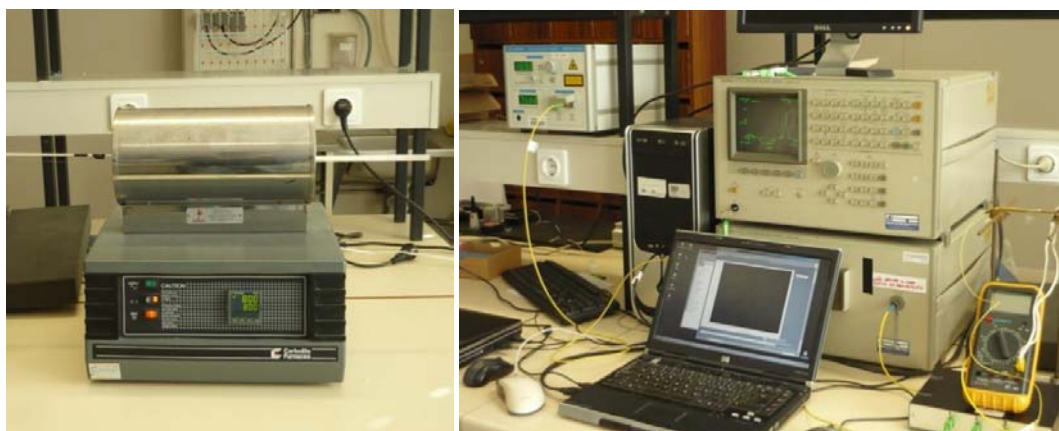


Figura 36: Montagem experimental do sistema para ensaios de altas temperaturas.



Na figura 37 poderá ser observado a caracterização de uma LPG à temperatura gravada através de radiação UV. A rede foi gravada com uma exposição mais prolongada do que as restantes redes gravadas ao longo do trabalho.

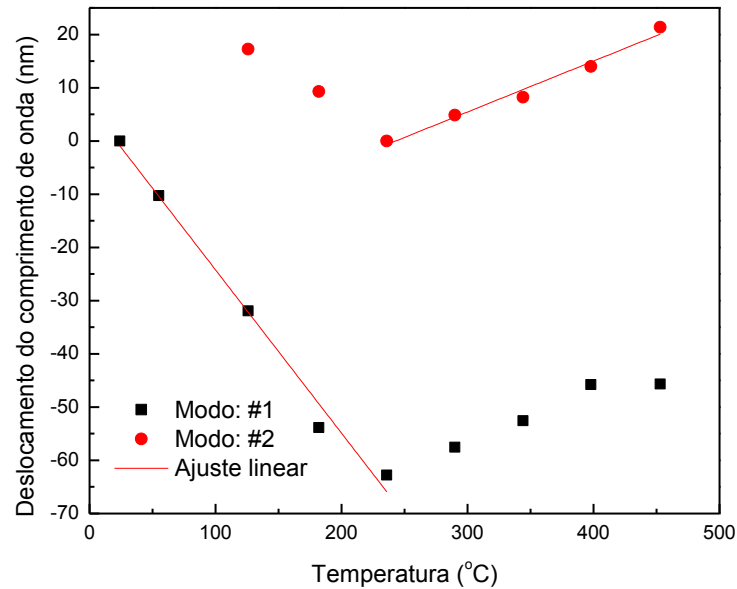


Figura 37: Caracterização de uma LPG gravada através de radiação UV à temperatura, LPG2.

Observa-se que o modo #1 tem um declive negativo,  $S_T = -0,31 \pm 0,02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  para a gama de valores compreendidos entre os 20 °C e os 250°C. Por sua vez, o modo #2, para valores de temperatura superiores a 250°C, tem uma sensibilidade positiva  $S_T = 0,096 \pm 0,008 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , aproximadamente três vezes menor que a gama inferior de temperaturas.

#### 5.4.2. Redes gravadas por arco eléctrico

O método de gravação de LPGs por arco eléctrico não tem origem num fenómeno óptico, ao contrário das redes gravadas por UV. Neste processo o índice de refração é alterado localmente através de aplicação de corrente eléctrica. Tomando este princípio como ponto de partida, admitiu-se inicialmente que estas redes poderiam resistir a temperaturas mais altas do que as redes gravadas por UV.

Utilizando a montagem da figura 36, realizou-se um primeiro ensaio atingindo-se a temperatura de 1000 °C, valor este que foi confirmado por um termopar que registou a temperatura de 1060°C.

A figura 38 mostra os resultados obtidos do espectro de transmissão da LPG6 à temperatura de 1060 °C.

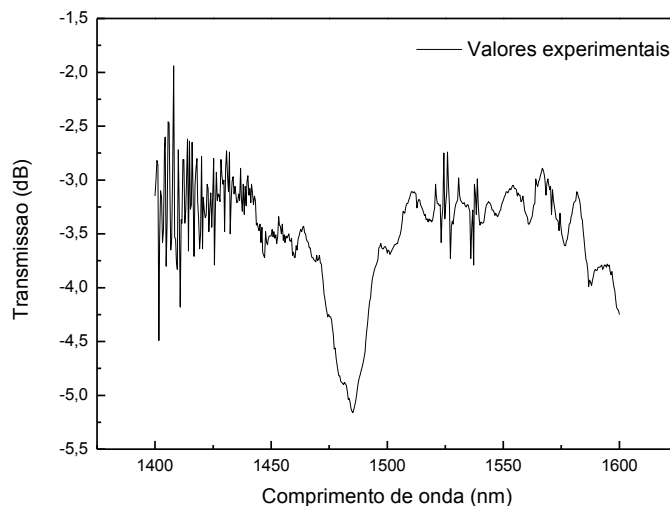


Figura 38: Espectro de transmissão de uma LPG à temperatura de 1060 °C, LPG6.

Observou-se que os modos de ressonância descolam-se para um valor de menor comprimento de onda com o aumento da temperatura. Dada a sua grande variação não foi possível monitorizar um só modo durante todo o ensaio. Verificou-se também que a potência do espectro de transmissão diminui com o incremento da temperatura.

A monitorização dos vários modos ao longo do seu deslocamento na zona de observação visível do OSA permitiu obter o gráfico da figura 39.

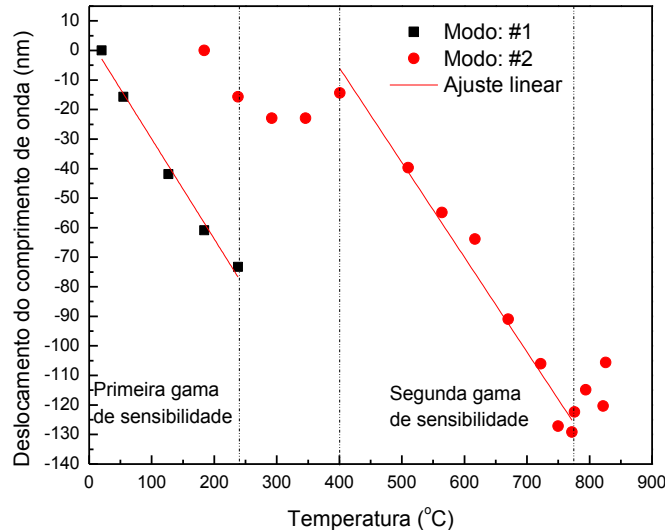


Figura 39: Caracterização de uma LPG gravada por arco eléctrico à temperatura, LPG6.

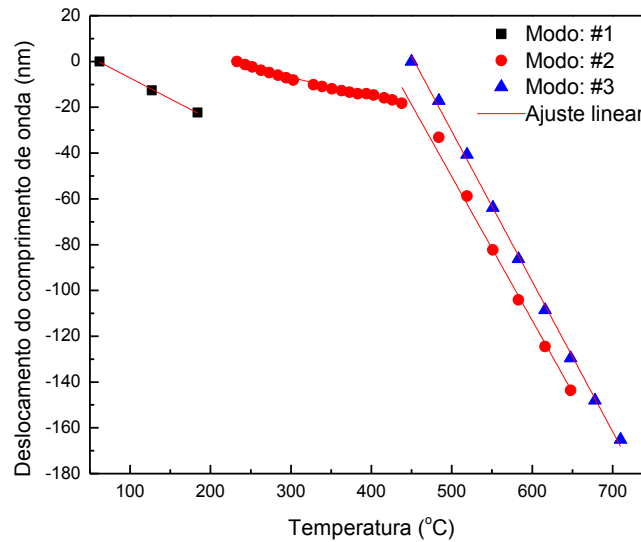
O valor da sensibilidade experimental à temperatura do modo #1 foi de  $S_T = -0,34 \pm 0,02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  e o respectivo coeficiente de correlação apresenta um valor de 0,9877. Para a gama de valores entre os 400 °C e 800°C obteve-se o valor de sensibilidade de  $S_T = -0,32 \pm 0,02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ .

Conclui-se que, para temperaturas de ordem inferiores, as redes gravadas por UV e arco eléctrico apresentam um efeito semelhante na taxa de variação de comprimento

de onda em função do parâmetro físico em causa. Para temperaturas superiores, a rede escrita por arco eléctrico revela um valor de sensibilidade superior.

Verificou-se que, ao ter submetido a LPG a altas temperaturas, ocorreram diferenças significativas no espectro de transmissão registado à temperatura ambiente. Por um lado, verificou-se um deslocamento no modo central do comprimento de onda de ressonância e, por outro lado, identificou-se mais ruído no sinal do espectro. Neste caso, utiliza-se o conceito de reversibilidade para as alterações no espectro de uma rede causadas por altas temperaturas, fenómeno que foi estudado por Rego *et al.* [21]. Os investigadores concluíram que, para temperaturas inferiores a 1000 °C, a irreversibilidade poderá dever-se a tensões intrínsecas induzidas no material da fibra. Para temperaturas superiores a 1000 °C, a irreversibilidade provém da deformação plástica do material.

Para averiguar o impacto do efeito do recozimento na sensibilidade de uma LPG, realizou-se novamente um ensaio à temperatura. Os resultados são mostrados na figura 40.



**Figura 40:** Caracterização de uma LPG gravada por arco eléctrico à temperatura. Ensaio efectuado após ter submetido a LPG à temperatura de 1060 °C. LPG6.

A sensibilidade à temperatura obtida para o primeiro modo é de  $S_T = -0,183 \pm 0,008 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ .

Verifica-se para valores de temperatura entre os 233 °C e os 438, uma sensibilidade de  $S_T = -0,083 \pm 0,003 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  e, dos 438 °C aos 648 °C, obteve-se um valor de  $S_T = -0,656 \pm 0,009 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ .

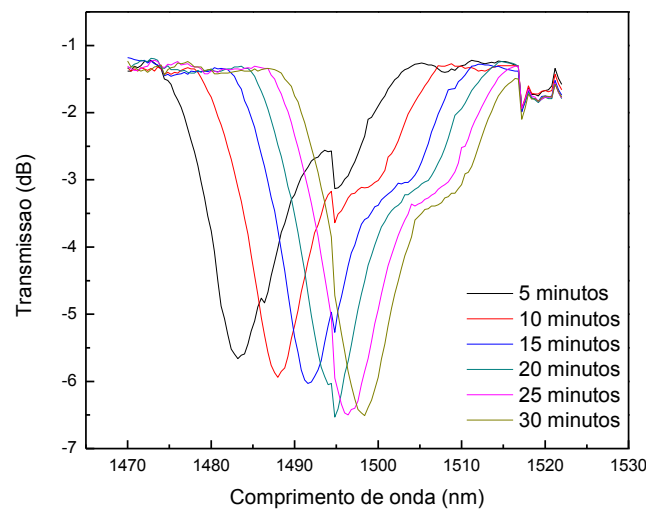
Também é possível monitorizar a temperatura analisando o terceiro modo entre os 450 °C e os 710 °C com uma sensibilidade de  $S_T = -0,63 \pm 0,03 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ .

Verifica-se que o recozimento da fibra aumentou, de forma geral, as taxas de variação dos modos específicos. Em cada modo, o valor correspondente é o dobro da

sensibilidade antes do recozimento. Adicionalmente, para a gama de valores entre os 200 °C e os 400 °C, originou um efeito linear que anteriormente não era possível ser medido.

Conclui-se que existem três regiões distintas, a primeira que vai da temperatura ambiente até aos 450 °C e que tem menor sensibilidade. A segunda que vai dos 450 °C aos 700 °C e possui uma maior sensibilidade do que a anterior. Finalmente, para além dos 710 graus verificou-se que o efeito do deslocamento do comprimento de onda com a temperatura deixa de ser linear, facto este que foi observado nos dois ensaios.

Com o objectivo de observar o comportamento da LPG durante um período de tempo no qual se mantém a temperatura a 900 °C foi registado o seguinte gráfico:



**Figura 41: Espectro do segundo ensaio à temperatura da LPG6 a 900 °C durante 30 minutos.**

Inicialmente existe um maior deslocamento do comprimento de onda o que poderá dever-se à estabilização da temperatura durante os primeiros minutos da monitorização. Observa-se que após os 20 minutos o deslocamento do comprimento de onda tende a diminuir.

Em suma, poderá afirmar-se que, embora as redes gravadas por arco eléctrico não possuam um comportamento linear a altas temperaturas, estas não apagam definitivamente até cerca dos 1000 °C. Tal significa que poderão ser utilizadas em processos que temporariamente ascendam a temperaturas da ordem dos 700 °C, mas cujo objectivo será monitorizar abaixo desta temperatura.

## **6.1.      Conclusões**

Este trabalho teve como objectivo principal a caracterização de redes de período longo e a sua produção.

Nos ensaios de caracterização foram analisadas redes gravadas através de radiação UV pelo método ponto-a-ponto assim como a sua posterior corrosão, e por arco eléctrico.

O método de gravação através de radiação UV permitiu o fabrico de LPGs com elevada qualidade. Por vezes, durante as gravações, verificou-se o surgimento de modos de ressonância perturbados que se afastam dos resultados teóricos previstos na literatura. A caracterização destes modos permitiu constatar diferentes sensibilidades ao índice de refacção assim como o aparecimento de certos modos que revelaram insensibilidade ao parâmetro deformação. Neste seguimento estará patente ao longo do trabalho o desenvolvimento de um sensor multi-parâmetro.

Ainda no âmbito da gravação, observou-se após a remoção do hidrogénio, que certas redes demonstraram um deslocamento do comprimento de onda de ressonância para fora dos limites observáveis do ONA o que inviabilizou a monitorização dessas mesmas redes.

Para às LPGs gravadas por ponto-a-ponto foram efectuados ajustes exponenciais aos pontos experimentais dos ensaios ao índice de refacção. Os correspondentes coeficientes de correlação comprovaram a opção dos ajustes.

A gama de valores de índice de refração registada foi de 1,347 a 1,444. Concluiu-se que a sensibilidade tem um valor menor para valores de índice de refração inferiores. Para o índice de refração de 1,459 o espectro de transmissão apresentou um valor aproximadamente nulo e poderá ser explicado pelo facto do valor ser muito próximo do índice de refração da bainha.

A corrosão da estrutura da bainha também demonstrou ser uma técnica interessante para aumentar a sensibilidade. Para redes cujo comprimento de onda de ressonância se encontra muito próximo do comprimento de onda inferior da janela do aparelho de registo, a corrosão provou ser uma alternativa para deslocar o modo de ressonância para valores superiores. Observou-se que esta técnica originou também o aumento da potência transmitida do vale central em cerca de 3 dB. Como desvantagem, este processo contribui para a diminuição da robustez da própria fibra.

Para as redes gravadas por arco eléctrico verificou-se uma maior sensibilidade ao índice de refração. Contudo, o ajuste efectuado demonstrou uma qualidade inferior em relação às redes gravadas por exposição UV.

Com base nos ensaios à deformação, concluiu-se que o método de gravação por laser permitiu fabricar sensores com um comportamento linear que o método de gravação por arco eléctrico não demonstrou. Verificou-se o aumento da sensibilidade à deformação após a corrosão.

Relativamente à temperatura, verificou-se que os dois métodos de gravação permitiram a produção de redes com respostas ao parâmetro físico em causa de elevada qualidade. Para o método de gravação ponto-a-ponto a LPG sem corrosão apresentou uma sensibilidade que variou entre  $S_T = -0,252 \pm 0,002 \text{ nm/}^\circ\text{C}$  e  $S_T = -0,267 \pm 0,002 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ , para a LPG corroída obteve-se  $S_T = -0,326 \pm 0,003 \text{ nm/}^\circ\text{C}$  e para a LPG gravada por arco eléctrico determinou-se o valor de  $S_T = -0,365 \pm 0,001 \text{ nm/}^\circ\text{C}$ .

Por fim, na secção de caracterização a altas temperaturas as LPG gravadas por arco eléctrico permitiram a monitorização de temperaturas superiores às LPG gravadas por laser. Efectuaram-se dois ensaios à temperatura usando uma rede gravada por arco eléctrico. Deste modo, verificou-se um aumento linear com a temperatura dos modos de ressonância até aos 710 °C. Para temperaturas superiores observou-se que o espectro de transmissão não apagava até cerca dos 1000 °C. Contudo, o comprimento de onda, nesta gama de valores, não apresentou um comportamento linear.

Finalmente, ainda com base nos ensaios referidos, concluiu-se que, ao ter atingindo temperaturas da ordem dos 1000 °C, não se verificou reversibilidade no espectro de transmissão. Observou-se também, como resultado da aplicação de temperaturas de ordem elevada, que os valores de sensibilidade foram alterados. Propõe-se efectuar de futuro uma análise mais detalhada em relação a este processo pois será de todo o interesse averiguar a razão da alteração da sensibilidade no fenómeno descrito.

## 6.2. Trabalhos futuros

Os estudos desenvolvidos no âmbito do presente trabalho tiveram especial realce num carácter experimental. Procurou-se realizar o máximo número de caracterizações a determinados parâmetros físicos que tiveram como objectivo abrir novas portas para aplicações de futuro.

Em relação à fotossensibilidade, e neste caso em específico, ao processo de hidrogenação, será interessante uma monitorização mais atenta de todo o processo. Um estudo experimental, tendo por base o tempo de exposição de hidrogénio, a quantidade deste elemento químico absorvido e o seu efeito na alteração do índice de refacção local poderá trazer vantagens no controlo de gravação por laser UV e evitar gravar redes que por vezes não são utilizáveis devido ao grande deslocamento do comprimento de onda para zonas não pretendidas.

No seguimento dos resultados obtidos nos ensaios ao índice de refacção utilizando redes gravadas por laser será de todo o interesse aplicar redes de período longo na medição da concentração de iões, tal como foi inicialmente proposto. Poderá ser equacionado a aplicação na área da microbiologia, em particular, na monitorização de colónias de bactérias em ambientes aquosos.

O desenvolvimento de sensores multi-parâmetro não tem sido completamente explorado pelos investigadores, e de acordo com os resultados obtidos verifica-se que as LPGs terão um contributo a dar nesta matéria. Um sensor constituído por uma única LPG capaz de medir simultaneamente variações de índices de refacção e deformações poderá ser investigado e sugere-se desde já, por exemplo, a sua utilização na monitorização de degradação de estruturas.

O estudo referido deverá ser complementado com um estudo do aparecimento de modos temporários durante a gravação das redes pois um maior número de modos aumenta a probabilidade de que alguns sejam insensíveis a determinados parâmetros e sensíveis a outros.

Finalmente, aproveitando a característica de ser possível fixar LPGs em estruturas com um raio de curvatura e anular o efeito da temperatura medindo alterações de índice de refacção e deslocamento poderá ser estudado a viabilidade de colocação dos sensores em velas usadas nos desportos náuticos. Deste modo seria possível estudar os efeitos de oxidação a longo prazo bem como avaliar o desempenho de diferentes afinações na resistência de uma vela.

## Apêndice A

## Lista de redes utilizadas

Neste apêndice será descrito a informação relativa às redes de período longo gravadas por UV e através de arco eléctrico que foram utilizadas em ensaios ao longo do trabalho.

*Tabela 2: Redes gravadas por UV*

Número da rede	Frequência (hz)	Período ( $\mu\text{m}$ )	Abertura da slit ( $\mu\text{m}$ )	Tempo de cada exposição (s)	Comprimento da rede (mm)
LPG1	500	410	210	12	25
LPG2	500	430	210	15	30
LPG3	500	410	195	14	41
LPG4	500	600	300	40	40

*Tabela 3: Redes gravadas por arco eléctrico*

Número da rede	Tipo de fibra	Período ( $\mu\text{m}$ )	Potência do arco (Bit)	Tempo de cada arco (s)	Número de pontos	Comprimento da rede (mm)
LPG5	Fotossensível	680	15	0,2	34	24
LPG6	Fotossensível	680	15	0,2	46	30



- [1] K. C. Kao and G. A. Hockham, "Dielectric -fibre surface waveguides for optical frequencies," *Proc. IEE.*, vol. 113, no. 7, pp. 1151-1158, 1966.
- [2] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, pp. 647-649, May 1978.
- [3] D. K. W. LAM and B. K. GARSIDE, "Characterization of single-mode optical fiber filters," *Appl. Opt.*, vol. 20, no. 3, pp. 440-445, 1981.
- [4] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method," *Opt.Lett.*, vol. 14, no. 15, pp. 823-825, 1989.
- [5] D. L. Williams, B. J. Ainslie, J. R. Armitage, R. Kashyap, and R. Campbell, "Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibers," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 1, pp. 45-47, 1993.
- [6] P. J. Lemaire, R. M. Atkins, V. Mizrahi, and W. A. Reed, "High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibres," *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 13, pp. 1191-1193, 1993.
- [7] A. M. Vengsarkar, et al., "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 58-65, 1996.
- [8] G. Meltz, S. J. Hewlett, and J. D. Love, "Fiber grating evanescent -wave sensors," in *CHEMICAL, BIOCHEMICAL, AND ENVIRONMENTAL FIBER SENSORS VIII*, vol. 2836, 1996 , pp. 342-350.
- [9] A. Iadicco, A. Cusano, A. Cutolo, R. Bernini, and M. Giordano, "Thinned fiber Bragg Gratings as high sensitivity refractive index sensor," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 4, pp. 1149-1151, Apr. 2004.
- [10] W. Liang, Y. Huang, Y. Xu, R. K. Lee, and A. Yariv, "Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors," *Applied Physics Letters*, vol. 86, no. 15, 2005.
- [11] X. Sang, et al., "Temperature-insensitive chemical sensor based on a fiber Bragg grating," *Science Direct*, vol. 120, no. 2, pp. 754-757, 2007.

- 
- [12] D. Pereira, O. Frazão, and J. L. Santos, "Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature," *Opt. Eng.*, vol. 43, pp. 299-304, 2004.
- [13] Y. Miao, B. Liu, and Q. Zhao, "Refractive index sensor based on measuring the transmission power of tilted fiber Bragg grating," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 233-236, 2009.
- [14] C. Caucheteur and P. Mégre, "Demodulation technique for weakly tilted fiber Bragg grating refractometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 12, 2005.
- [15] G. Laffont and P. Ferdinand, "Tilted short-period fibre Bragg grating induced coupling to cladding modes for accurate refractometry," *Meas Sci. Technol.*, vol. 12, no. 7, pp. 766-770, 2001.
- [16] L. Zhang, Y. Liu, L. Overall, J. A. R. Williams, and I. Bennion, "Design and realization of long-period grating devices in conventional and high birefringence fibers and their novel applications as fiber-optic load sensors," *Quantum Electron.*, vol. 5, no. 5, pp. 1373-1378, 1999.
- [17] J. H. Chong, et al., "Measurements of refractive index sensitivity using long-period grating refractometer," *Opt. Commun.*, vol. 229, pp. 65-69, 2004.
- [18] M. Jiang, A. Zhang, Y. Wang, H. Tam, and S. He, "Fabrication of a compact reflective long-period grating sensor with a cladding-mode-selective fiber end-face mirror," *Optics Express*, vol. 17, no. 20, 2009.
- [19] Y. Qian, et al., "High sensitive long period fiber grating sensor for detection of nitrite," *Chem. Res. Chinese Universities*, vol. 25, no. 5, pp. 624-627, 2009.
- [20] S. Bey, C. Lam, T. Sun, and K. Grattan, "Long period grating pair chloride ion sensor for early corrosion prevention," *Journal of Physics*, vol. 85, pp. 1-6, 2007.
- [21] G. Rego, O. Okhotnikov, E. Dianov, and V. Sulimov, "High-Temperature Stability of Long-Period Fiber Gratings Produced an Electric Arc," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 19, no. 10, pp. 1574-1579, 2001.
- [22] G. Humbert and A. Malki, "Electric-arc-induced gratings in non-hydrogenated fibres: fabrication and high-temperature characterizations," *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol. 4, no. 2, pp. 194-198, 2002.
- [23] T. Venugopalan, t. Sun, and K. T. V. Grattan, "Temperature characterization of Long Period Gratings written in three different types of optical fibre for potential high temperature measurements," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 160, no. 1-2, pp. 29-34, 2010.
- [24] T. Allsop, T. Earthrowl-Gould, D. Webb, and I. Bennion, "Embedded progressive-three-layered

fiber long-period gratings for respiratory monitoring," *J. Biomed. Opt.*, vol. 8, 2003.

- [25] V. Bhatia, M. Burford, K. Murphy, and A. Vengsarkar, "Long-period fiber grating sensors," in *OFC'96*, 1996, pp. 265-266.
- [26] V. Bhatia, D. Campbell, R. Claus, and A. Vengsarkar, "Simultaneous strain and temperature measurement with long-period gratings," *Optics Letters*, vol. 22, no. 9, 1997.
- [27] A. M. Vengsarkar, et al., "Long-period fiber-grating-based gain equalizers," *OPTICS LETTERS*, vol. 21, no. 5, pp. 336-338, 1996.
- [28] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, 1997.
- [29] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*, 7th ed. Cambridge University Press, 1999.
- [30] V. Bhatia and A. M. Vengsarkar, "Optical fiber long-period grating sensors," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 9, pp. 692-694, 1996.
- [31] W. S. James and R. Tatam, "Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. R49-R61, 2003.
- [32] P. Palai, M. N. Satyanarayan, M. Das, K. Thyagarajan, and B. P. Pal, "Characterization and simulation of long period gratings fabricated using electric discharge," *Opt. Commun.*, vol. 193, no. 1-6, pp. 181-185, 2001.
- [33] Y. G. Han, B. H. Lee, W. T. Han, U. C. Paek, and Y. Chung, "Resonance peak shift and dual peak separation of long-period fiber gratings for sensing applications," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 7, pp. 699-701, 2001.
- [34] V. Bhatia, et al., "Temperature-insensitive and strain-insensitive long-period grating sensors for smart structures," *Opt. Eng.*, vol. 36, 1997.
- [35] Y. Han, C. Kim, U. Paek, and Y. Chung, "Performance Enhancement of long period fiber gratings for strain and temperature sensing," *IEICE Trans. Electron.*, vol. E83-C, no. 3, pp. 282-286, 2000.
- [36] O. Duhem, J. F. Henninot, M. Warenghem, and M. Douay, "Demonstration of long-period-grating efficient couplings with an external medium of a refractive index higher than that of silica," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 31, pp. 7223-7228, 1998.
- [37] M. Konstantaki, S. Pissadakis, S. Pispas, N. Madamopoulos, and N. A. Vainos, "Optical fiber long-period grating humidity sensor with poly(ethylene oxide)/cobalt chloride coating," *Appl. Optics.*, vol. 45, no. 19, pp. 4567-4571, 2006.

- 
- [38] Y. Liu, et al., "Long-period grating relative humidity sensor with hydrogel coating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 9-12, pp. 880-882, 2007.
- [39] Y. Kondo, et al., "Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 10, pp. 646-648, 1999.
- [40] D. D. Davis, et al., "Long-period fibre grating fabrication with focused CO<sub>2</sub> laser pulses," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 3, pp. 302-303, 1998.
- [41] D. Davis, T. Gaylord, E. Glytsis, and S. Mettler, "CO<sub>2</sub> laser-induced long-period fibre gratings: Spectral characteristics, cladding modes and polarisation independence," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 14, pp. 1416-1417, 1998.
- [42] V. Karpov, et al., "Mode-field converters and long-period gratings fabricated by thermodiffusion in nitrogen-doped-silica-core fibers," *Proc. Mater. Res. Soc. Symp.*, vol. 531, pp. 391-396, 1998.
- [43] M. Fujumaki, Y. Ohki, J. L. Brebner, and S. Roorda, "Fabrication of long-period optical fiber gratings by use of ion implantation," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 2, pp. 89-90, 2000.
- [44] E. Dianov, et al., "Ultra-thermostable long-period gratings written in nitrogen-doped silica fibers," in *Materials-Research-Society Symposium on Reliability of Photonics Materials and Structures*, vol. 531, 1998, pp. 391-396.
- [45] C. Narayanan, H. Presby, and A. Vengsarkar, "Band-rejection fibre filter using periodic core deformation," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 4, pp. 280-281, 1997.
- [46] R. Nogueira, "Redes de Bragg em fibra óptica," Universidade de Aveiro Tese de Doutorado, 2005.
- [47] S. A. Vasil'ev, et al., "Fibre gratings and their applications," *Quantum Electron.*, vol. 35, no. 12, pp. 1085-1103, 2005.
- [48] C. Marques, "Gravação de redes de Bragg avançadas em fibra óptica," Universidade de Aveiro Dissertação, 2008.
- [49] S. Smietana, W. Bock, and P. Mikulic, "Comparative study of long-period gratings written in a boron co-doped fiber by an electric arc and UV irradiation," *Measurement Science and Technology*, vol. 21, pp. 1-8, 2010.